

А.С. Березин
О.Р. Мочалкина

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

*Рекомендовано Комитетом по высшей школе
Миннауки России в качестве учебного пособия
для студентов вузов,
обучающихся по специальностям:
«Физика и технология материалов
и компонентов электронной техники»
и «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы»*



Москва
«Радио и связь»
1992 г

ББК 32.842

Б 48

УДК 621.3.049.77

Рецензенты: кафедра интегральной электроники МПЭА, Пичугин П. Г.

Редакция литературы по электронной технике

Березин А.С., Мочалкина О. Р.

Б 48 Технология и конструирование интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1992. — 320 с.: ил.

ISBN 5-256-01014-X.

Последовательно рассмотрены вопросы технологии кремниевых полупроводниковых, пленочных и гибридных интегральных микросхем различной степени интеграции, методы проектирования их элементной базы. Описаны типовые технологические процессы производства. Изложены принципы конструирования этих микросхем. Указаны конструктивно-технологические особенности больших и сверхбольших интегральных микросхем, а также микросхем на арсениде галлия. Особое внимание уделено задачам и методам машинного проектирования микросхем.

Для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов.

Б 2302030700-079 28-92
046(01)-92

ББК 32.842

Учебное издание

**Березин Андрей Сергеевич
Мочалкина Ольга Романовна**

Учебник

**ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ
МИКРОСХЕМ**

Заведующий редакцией Ю. Н. Рысев. Редактор Н. И. Кузнецова.
Перевел художника В. Я. Виганта. Художественный редактор Н. С. Шени.
Технический редактор Л. А. Горшкова. Корректор Н. Л. Жукова.

ИБ № 1753

Сдано в набор 1.10.91

Подписано в печать 25.05.92

Формат 60×84

Бумага тип. № 2

Гарнитура литературная

Печать высокая

Усл. печ. л. 18,60

Усл. кр. отт. 18,60

Уч.-изд. л. 20,64

Тираж 3500 экз.

Изд. № 22602

Зак. № 90

С-079

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Почтамт, а/я 693

Типография издательства «Радио и связь». 101000 Москва, ул. Мясницкая, д. 40

ISBN 5-256-01014-X

© Березин А. С., Мочалкина О. Р., 1992

ПРЕДИСЛОВИЕ

Последние годы развития микроэлектроники связаны с широким внедрением в производство больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС, СБИС), что обуславливает необходимость разработки новых технологических процессов и новых подходов при конструировании. В настоящее время создаются кремниевые микросхемы на биполярных и полевых транзисторах, на транзисторах с барьером Шоттки.

Технологические процессы, которые ко времени первого издания учебного пособия находились на начальной стадии развития, в настоящее время широко применяются для изготовления как кремниевых, так и арсенид-галлиевых микросхем. К ним следует отнести молекулярно-лучевую эпитаксию, плазменно-ионное и плазменное травление различных материалов, локальное термическое окисление кремния, охлаждение тонких пленок из парогазовых смесей, создание многоуровневой металлической разводки, в том числе с использованием пленок сплавов металлов.

В конструировании микросхем также произошли изменения: существенно повысилась роль БИС на комплементарных МДП-транзисторах, приборах с зарядовой связью, биполярных транзисторах со щелевой изоляцией и некоторых других типах элементов; в связи с уменьшением толщины базовой области $n-p-n$ транзистора возросла роль эффекта отеснения эмиттерного тока; нуждаются в более пристальном внимании эффекты сильного легирования эмиттера. Особое место занимает система автоматического проектирования (САПР) топологии микросхем.

Следует особо отметить, что, как и в первом издании, авторы постарались связать между электрическими и конструктивными характеристиками элементов выразить аналитическими зависимостями.

К сожалению, небольшой объем учебного пособия не позволял в полной мере осветить все необходимые проблемы. Однако несмотря на указанные ограничения авторы переработали материал первого издания книги, в учебное пособие введены новые разделы.

Учебное пособие предназначено прежде всего для специальнос-

тей 20.02, 20.03. Оно рассчитано на студентов, знакомых с основами физики полупроводников и полупроводниковых приборов, а также с основами микроэлектроники, а также может быть полезно инженерам.

О. Р. Мочалкиной написаны главы 1—9, § 18.1, А. С. Березиним — главы 10—17, § 18.2 и Приложение. Предисловие — совместно обоими авторами.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Я. А. Федотову, доценту А. А. Щуке и доценту И. Г. Пичугину за сделанные ими ценные замечания, направленные на улучшение учебного пособия.

Глава 1. СТРУКТУРА ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1.1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии играет исключительную роль в создании высокого научно-технического уровня производства во всех областях народного хозяйства. Значимость технологии в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем особенно велика. Именно постоянное совершенствование технологии полупроводниковых приборов, начиная со времени создания первых транзисторов, привело на определенном этапе ее развития к изобретению микросхем, а в дальнейшем к широкому их производству.

Технология интегральных микросхем представляет собой совокупность механических, физических, химических способов обработки различных материалов (полупроводников, диэлектриков, металлов), в итоге которой создается интегральная микросхема.

Развитие полупроводниковой электроники, наряду с разработкой технологических методов, включало физические исследования принципов работы различных приборов, изобретение новых приборов, совершенствование методов очистки полупроводниковых материалов, проведение их физико-химических исследований с целью установления таких важнейших характеристик, как предельные растворимости примесей, коэффициенты диффузии донорных и акцепторных примесей и др.

Производство интегральных микросхем началось примерно с 1959 г. на основе предложенной к этому времени планарной технологии. Основой планарной технологии послужила разработка нескольких фундаментальных технологических методов. В 1957 г. показана возможность локальной диффузии донорных и акцепторных примесей в кремний с использованием в качестве защитной маски пленки двуокиси кремния, выращенной на поверхности кремния при высокотемпературной обработке в окислительной среде (термическое окисление). В 1958 г. разработан метод фотолитографии, позволяющий создавать *p-n* переходы малых раз-

меров и сложных конфигураций с помощью локальной диффузии. В 1959 г. на основе исследований поверхности полупроводников и стабилизации характеристик полупроводниковых приборов был разработан метод защиты *p-n* переходов от окружающей среды пленками двуокиси кремния. К этому времени были развиты процессы диффузионного введения примесей в полупроводники (в частности, в кремний) для получения легированных слоев разного типа проводимости и с различной концентрацией, а также процессы эпитаксиального наращивания монокристаллических кремниевых пленок. В шестидесятые годы исследовались вопросы, связанные с внедрением ионов в полупроводники, которые привели к разработке метода ионного легирования.

Быстрое развитие полупроводниковой электроники и отстаивание физико-химических исследований привели к тому, что технология полупроводниковых приборов и микросхем в течение длительного времени носила эмпирический характер. В последние годы уделяется большее внимание теоретическому анализу технологических процессов: разработаны модели основных технологических операций; машинное моделирование становится основой в разработке технологических циклов создания микросхем.

Резко возросла степень интеграции в микросхемах. За последнее десятилетие количество элементов в микросхеме увеличилось от десятков тысяч до сотен тысяч элементов, а в некоторых типах микросхем до 10^6 элементов. Повышение степени интеграции обеспечивается выполнением двух условий.

Во-первых, уменьшаются размеры элементов за счет совершенствования методов литографии. Сужение размеров наблюдалось в течение всего времени развития технологии микросхем. Если в начале 60-х годов минимальные размеры элементов составляли 100...200 мкм, в начале 1980-х годов — несколько микрометров, то к концу 1980-х годов они снизились до 1...3 мкм. Развивается субмикронная технология. Влияние размеров элементов на степень интеграции можно проследить на примере изготовления запоминающих устройств на МОП-микросхемах. Сужение длины канала МОП-транзисторов от 2 до 1 мкм приводит к повышению степени интеграции от 64 до 500 Кбит/см², а при совершенствовании конструктивной разработки до 1 Мбит/см².

Второе условие для повышения степени интеграции — увеличение площади кристалла — выполняется при совершенствовании всего технологического процесса. В последние годы размер кристалла с интегральной микросхемой возрос от $0,6 \times 0,6$ до 1×1 см². Несмотря на большие достижения микроэлектроники, глубокая теоретическая и экспериментальная проработка технологических процессов и сейчас остается одним из основных вопросов в производстве микросхем.

1.2. ТИПОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ МИКРОСХЕМ

Сочетанием методов термического окисления, фотолитографии и локальной диффузии были созданы $p-n$ переходы со структурой, представленной на рис. 1.1, получившие название планарных. В этой структуре p -область создается локальной диффузией акцепторной примеси на том участке поверхности, с которого методом фотолитографии удаляется пленка двуокиси кремния. Вследствие боковой диффузии образовавшийся $p-n$ переход в месте выхода на поверхность оказывается расположенным под пленкой двуокиси кремния, служившей маской при диффузии.

В основном два свойства планарных $p-n$ переходов обусловили возможность получения на их основе интегральных микросхем. Во-первых, резкое снижение обратных токов планарных $p-n$ переходов, защита которых от окружающей среды пленкой двуокиси кремния осуществляется непосредственно в процессе образования $p-n$ перехода. Во-вторых, одностороннее расположение контактов к составляющим $p-n$ переход областям и, как следствие этого, возможность соединения различных контактных площадок металлизированными дорожками. В сочетании перечисленных методов с методом эпитаксиального наращивания кремния (эпитаксией) создаются интегральные микросхемы. Структуры элементов основных типов кремниевых микросхем представлены на рис. 1.2--1.5.

Для изготовления биполярных микросхем с изоляцией элементов $p-n$ переходом (структура транзистора в таких схемах представлена на рис. 1.2) используется кремниевая подложка с эпитаксиальным слоем со структурой типа $p-n$, (p — подложка; n — эпитаксиальный слой). Для изготовления биполярных микросхем с инжекционным питанием (см. рис. 1.3) используется кремниевая подложка со структурой типа n^+-p . На рис. 1.4 представлена структура элементов МОП-микросхемы.

Структуры КМОП-транзисторов на гетероэпитаксиальном слое кремния на сапфире (КНС) представлены на рис. 1.5. Технологические процессы изготовления разных типов микросхем построены на чередовании нескольких основных операций. Это позволяет создать единую технологическую схему, приемлемую для всех планарных приборов.

Таковыми операциями являются:

1. Резка слитков кремния на пластины. Механическая обработка пластины кремния — подложек, состоящая из шлифовки и полировки, проводимых с целью получения структуры поверхности, удовлетворяющей заданным требованиям.

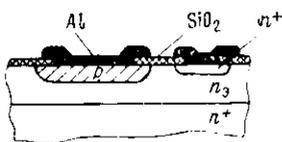


Рис. 1.1. Структура планарного $p-n$ перехода

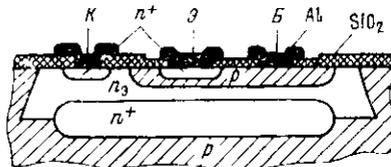


Рис. 1.2. Структура транзистора в микросхеме с изолирующей элементов $p-n$ переходом

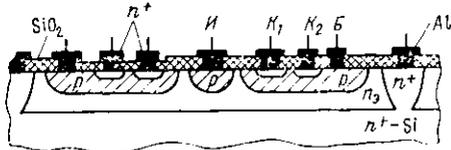


Рис. 1.3. Структура транзистора в микросхеме с инжекционным питанием: И — инжектор

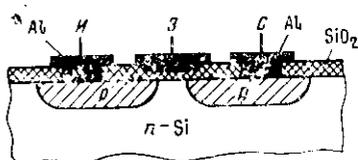


Рис. 1.4. Структура транзистора в микросхеме на МОП-транзисторах

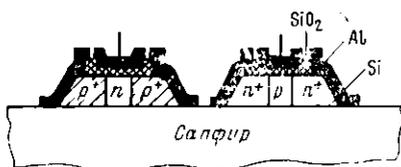


Рис. 1.5. Структура КМОП-транзистора

2. Химическая обработка в разнообразных химических реактивах, проводимая с целью очистки поверхности пластины и получения микрорельефа.

3. Окисление пластины кремния с целью получения на поверхности пленки двуокиси кремния, маскирующей поверхность кремния при его локальном легировании.

4. Эпитаксиальное наращивание кремния на кремниевые или инородные подложки.

5. Получение в кремнии слоев, легированных заданными примесями, методом диффузии, ионного внедрения или комбинацией этих методов.

6. Нанесение тонких металлических пленок на рабочую поверхность пластины с целью получения омических контактов к слоям, образующим структуры элементов микросхем, и электрической разводки между элементами.

7. Литография, проводимая с целью, во-первых, образования рисунка в маскирующих пленках для проведения процессов локального легирования, во-вторых, контактных окоп, в-третьих, для формирования рисунка электрической разводки.

8. Проверка параметров интегральных микросхем, полученных на одной подложке, с целью отбраковки неработоспособных.

9. Разделение пластины на кристаллы и сборка годных микросхем.

10. Технологические испытания на механическую прочность, устойчивость к циклическому воздействию температур, влагоустойчивость.

11. Окончательная проверка параметров микросхем и маркировка.

В течение технологического цикла изготовления микросхем операции окисления, легирования и литографии могут проводиться многократно. Число этих операций зависит от типа микросхемы и структуры ее элементов.

Для БИС и СБИС разработана модифицированная планарная технология, называемая изопланарной. В нее входят дополнительные операции получения рельефной поверхности на кремнии методом химического травления, нанесения на поверхность кремния пленок нитрида кремния, создания многоуровневой металлической разводки. Рисунки в пленке двуокиси кремния могут выполняться не фотолитографией, а другими методами, основанными на использовании более коротковолнового излучения: рентгенолучевой и ионной литографиями и электронолитографией. Их использование позволяет уменьшить размеры получаемых элементов. Кроме того, здесь для локального травления пленок двуокиси кремния и металлов широко используются методы ионно-плазменного травления вместо обычного жидкостного травления в химических реактивах, что также способствует уменьшению размеров элементов.

1.3. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Главной особенностью планарной технологии является ее универсальность. Технологический процесс состоит из повторяющегося комплекса трех операций (химическая обработка — термическая обработка — фотолитография). Самые разнообразные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы можно создавать только изменением комплекта фотошаблонов и режимов термических процессов.

В планарных приборах $p-n$ переходы защищаются от окружающей среды диэлектрической пленкой двуокиси кремния непосред-

ственно в процессе их создания, и защитная пленка двуокиси кремния сохраняется на всех этапах дальнейшего формирования структуры и ее обработки. Эта особенность планарных приборов обеспечивает высокую стабильность их параметров и надежность работы.

Планарная технология характеризуется большим разнообразием и высокой точностью задания геометрических конфигураций, взаимного расположения и линейных размеров $p-n$ переходов. Минимальные линейные размеры транзисторных структур в интегральных микросхемах, как отмечалось выше, составляют в настоящее время 1...3 мкм. Высокая стабилизация режимов при проведении термических процессов обеспечивает получение диффузионных слоев толщиной до 0,1 мкм с разбросом $\pm 10\%$. Это обеспечивает высокие электрические параметры планарных приборов и интегральных микросхем, повышение плотности упаковки элементов в микросхеме, создание БИС и СБИС. Достигнуто исключительно высокое быстродействие микросхем, характеризуемое временем задержки менее 0,1 нс на один логический элемент.

Важной особенностью планарной технологии является использование в ней группового метода изготовления: на одной подложке кремния изготавливается одновременно много микросхем. Их число зависит от диаметра подложки и площади, занимаемой микросхемой. После изготовления структур элементов, металлической разводки между элементами и металлических контактных площадок для присоединения внешних выводов корпуса, подложка кремния разрезается на отдельные кристаллы, содержащие уже только одну микросхему. Дальнейшая обработка каждого кристалла (сборка в корпус, присоединение выводов) ведется индивидуально. Это отступление от групповых методов, которые использовались на всех операциях до разделения подложки на кристаллы, приводит к увеличению стоимости процессов сборки микросхем по сравнению с другими технологическими процессами. В результате, как показывают оценочные данные, затраты на сборочные операции составляют 30...65% всех затрат на изготовление микросхем в зависимости от степени интеграции. В настоящее время для уменьшения стоимости сборки стремятся перенести групповые методы и на процессы сборки.

Групповой метод изготовления микросхем — это своего рода интеграция технологических процессов, т. е. одновременное соединение технологических процессов сотен и тысяч интегральных микросхем. Появилась тенденция расширить интеграцию технологических процессов, объединяя их в непрерывный процесс, проходящий в одной реакционной камере или в замкнутой многокамерной системе.

Уникальные структурные параметры и электрические характеристики интегральных микросхем получают при выполнении особых производственных условий: исключительно высокой технологической гигиене, использовании сложного технологического оборудования, применении особо чистых химических реактивов.

Особые требования предъявляются к чистоте производственных помещений, к их обеспыленности. В настоящее время эти требования состоят в обеспечении условий, когда в 1 м^3 воздуха содержится не более нескольких пылинкок размером от $0,3 \text{ мкм}$ и более. (В обычных условиях количество пылинкок колеблется в пределах $5000 \dots 1\,000\,000$ в литре воздуха.) При возрастании степени интеграции микросхем эти требования еще более ужесточаются. Для обеспечения этих условий создаются специальные системы фильтрации воздуха на основе мощных кондиционеров. Наиболее ответственные технологические участки располагаются в так называемых чистых комнатах, организуемых по принципу «комната в комнате», что улучшает герметизацию помещений. Из особых, нестирающихся материалов должны изготавливаться стены, полы и потолки. Спецодежда персонала должна быть изготовлена из материалов, не выделяющих пылевых частиц.

Требования к производственным условиям в технологии микросхем существенно выше тех, которые предъявляются в любом другом технологическом процессе. Учитывая эту особенность, можно отметить, что для повышения выхода годных микросхем, а следовательно и снижения их стоимости, большое значение приобретает автоматизация технологических процессов, позволяющая максимально снизить количество персонала, влияющие субъективных факторов на качество технологического процесса.

Глава 2. ОБРАБОТКА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК

2.1. ВВЕДЕНИЕ

В производстве интегральных микросхем обычно используются полупроводниковые материалы в виде монокристаллических слитков почти цилиндрической формы. Размеры слитков зависят от метода их выращивания и типа полупроводникового материала.

В настоящее время наибольшее распространение получили микросхемы на основе монокристаллов кремния, что обусловлено

высоким качеством маскирующей и защитной пленки двуокиси кремния, получаемой относительно простым технологическим способом. Это облегчает изготовление кремневых микросхем по планарной технологии. Кроме того, достаточно хорошо изучены методы легирования кремния различными примесями.

Пластины кремния, отрезанные от монокристаллического слитка и подвергнутые определенной механической и химической обработке, являются подложками для интегральных микросхем, резка монокристаллического кремния на пластины является первой механической операцией. Дальнейшая обработка отрезанных пластин состоит в их шлифовке и полировке и направлена на получение заданных микрорельефа поверхности и структуры приповерхностных слоев. Особую роль играет химическая очистка поверхности, поскольку в планарной технологии поверхность, очищенная на начальных стадиях технологического процесса перед термическим окислением, в дальнейшем уже не подвергается какой-либо обработке.

2.2. ОРИЕНТИРОВАНИЕ СЛИТКОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Кремнию как кристаллическому материалу свойственна анизотропия. Пластины, вырезанные из слитка по тому или иному кристаллографическому направлению, обладают различными физико-химическими свойствами. Это различие может повлиять на проводимые в дальнейшем технологические процессы. Поэтому необходимо ориентировать полупроводниковые монокристаллические слитки и резать их в соответствии с выбранной ориентацией.

Метод ориентирования основан на отражении рентгеновского излучения от кристаллографических плоскостей слитка и фиксации максимальной интенсивности отраженного излучения, наблюдаемой при выполнении условия Вульфа — Брегга:

$$2d \sin \theta = n \lambda,$$

где d — межплоскостное расстояние; λ — длина волны рентгеновского излучения; n — целое число.

Это условие позволяет найти для заданного рентгеновского излучения (обычно $\lambda = 0,1539$ нм) и заданной кристаллографической плоскости угол θ .

Практическая реализация метода состоит в нахождении отклонения искривленной кристаллографической плоскости от плоскости торца слитка. Торцы слитка располагаются под углом θ относительно направления рентгеновских лучей. Вращая слиток вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, устанавливают такое

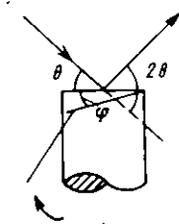


Рис. 2.1. Схема ориентирования монокристаллического слитка

положение торца по отношению к исходному, при котором интенсивность отраженного излучения максимальна. Если искомая кристаллографическая плоскость расположена под углом φ к плоскости торца (рис. 2.1), то максимальная интенсивность будет зафиксирована в том случае, когда слиток повернется на угол φ вокруг оси, нормальной к плоскости рисунка, и вокруг горизонтальной оси, лежащей в плоскости рисунка, так, чтобы нормаль к искомой плоскости лежала в плоскости рисунка.

Для ориентирования используется универсальный рентгеновский аппарат УРС-50И. Гониометрическое устройство ГУР-3, входящее в комплект аппарата, и специальная приставка служат для вращения слитка. Гониометрическое устройство позволяет производить точный отсчет углов. Интенсивность отраженного излучения определяется счетчиком рентгеновских квантов. Положение слитка при максимальной интенсивности отраженного излучения фиксируется отсчетом углов на гониометрическом устройстве и прочерчиванием риски на торце с пометкой стороны слитка, от которой отсчитывается угол отклонения искомой кристаллографической плоскости от плоскости торца. Полученные данные используют при креплении слитков в устройствах для их ориентированной резки.

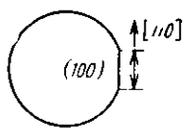


Рис. 2.2. Кремниевая подложка с базовым срезом

Ориентирование слитков кремния рентгеновским методом осуществляется не только с целью установления точной ориентации поверхности подложек, но и для получения на них базового среза (рис. 2.2). Срез по заданному кристаллографическому направлению служит для ориентирования топологического рисунка микросхемы на подложке. Такое ориентирование имеет существенное значение в ряде технологических операций изготовления микросхем, например при создании изоляции элементов микросхем, при скрайбировании и ломке на кристаллы и некоторых других. Для получения среза на подложках слитки шлифуют параллельно оси.

В производстве кремневых микросхем обычно используются подложки либо ориентированные по кристаллографической плоскости (100), либо разориентированные на несколько градусов относительно кристаллографической плоскости (111). Подложки ориентации (100) используются для изготовления МОП-микросхем, поскольку наблюдается анизотропия плотности поверхностных состояний, и наименьшая плотность характерна для плоскости (100). Бинолярные БИС создаются на разориентированных подложках. Необходимость разориентации будет рассмотрена в пятой главе.

2.3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА КРЕМНИЯ

Кремний — твердый и хрупкий материал. Эти свойства кремния определяют способы его механической обработки и выбор абразивных материалов.

Необходимо учитывать, что слитки кремния имеют большой диаметр (более 80 мм с тенденцией роста до 100...150 мм).

В табл. 2.1 приведена сравнительная характеристика различных абразивных и полупроводниковых материалов по их твердости.

Таблица 2.1

| Наименование материала | Микротвердость, 10^{10} Н/м ² | Твердость по шкале Мооса | Наименование материала | Микротвердость, 10^{10} Н/м ² | Твердость по шкале Мооса |
|------------------------|--|--------------------------|------------------------|--|--------------------------|
| Алмаз | 10 | 10 | Кремний | 1,0 | 7 |
| Карбид бора | 4,9 | 10 | Германий | 0,8 | 6 |
| Карбид кремния | 3,5 | 9,5 | Арсенид галлия | 0,7 | 4,5 |
| Электрокорунд | 1,4 | 9,2 | | | |

Алмаз — самый твердый материал. При обработке кремния используют как природные, так и синтетические алмазы, не уступающие первым по механическим свойствам. Иногда применяют карбиды бора B_4C и кремния SiC , а также электрокорунд Al_2O_3 .

При механической обработке кремния обычно используются абразивные материалы с размером зерна менее 40 мкм (микророзетки). Чаще всего применяют группы микророзеток с зернами 14 мкм и меньше. В табл. 2.2 приведены марки и размеры зерен основной фракции используемых микророзеток.

Таблица 2.2. Микророзетки для шлифовки и полировки пластин кремния

| Марка микророзетки | M14 | M10 | M7 | M5 | АСМ7/5 |
|------------------------------------|---------|--------|-------|-------|--------|
| Размер зерна основной фракции, мкм | 14...10 | 10...7 | 7...5 | 5...3 | 7...5 |

Окончание табл. 2.2

| Марка микророзетки | АСМ5/3 | АСМ3/2 | АСМ2/1 | АСМ1/0,5 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|------------|
| Размер зерна основной фракции, мкм | 5...3 | 3...2 | 2...1 | 1 и мельче |

порошки марок М14, М10, М7 и М5 изготавливаются из карбидов бора, кремния и электрокорунда, микропорошки марок АСМ — из алмаза.

Резка слитков на пластины. Для изготовления микросхем монокристаллический слиток кремния должен быть разрезан на пластины. В настоящее время для этого в качестве режущего инструмента применяются металлические диски с внутренней алмазной режущей кромкой (рис. 2.3). Толщина диска 0,1... 0,15 мм. Слиток закрепляется на специальной оправке приклеиваем либо торца, либо цилиндрической поверхности. Способ резки зависит от вида крепления слитка (рис. 2.1, а, б). Режущий инструмент (диск) растягивается и закрепляется в специальном барабане на головке шпинделя станка для резки. Слиток разрезается кромкой с алмазной крошкой при вращении шпинделя. Частота вращения шпинделя составляет 3000... 5000 об./мин. Скорость подачи слитка перпендикулярно оси режущего диска составляет 40... 50 мм/мин (для слитков диаметром более 60 мм — не более 20... 30 мм/мин). После отрезания очередной пластины с помощью автоматической системы происходит возврат слитка в исходное положение, а также перемещение его на заданный шаг.

Устройство для закрепления слитка позволяет поворачивать слиток в горизонтальной и вертикальной плоскостях на требуемые углы по отношению к

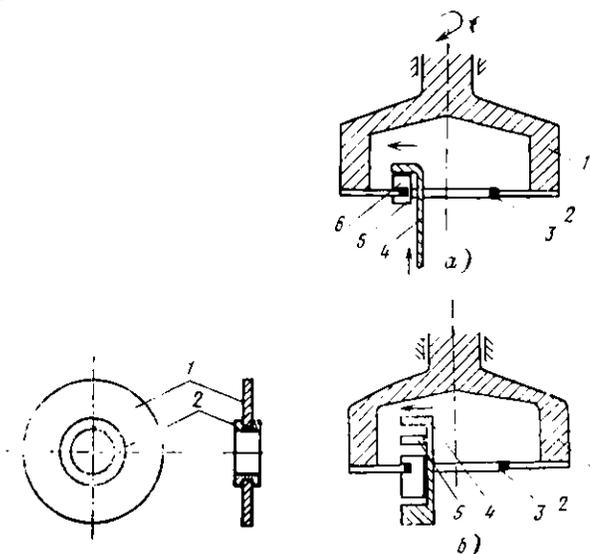


Рис. 2.3. Диск с алмазным покрытием для резки монокристаллов:

1 — металлический диск;
2 — покрытие из алмазной крошки

Рис. 2.1. Способы резки слитков:

а — внутренний; б — торцевой;
1 — барабан; 2 — диск; 3 — алмазное покрытие; 4 — оправка; 5 — пластина; 6 — слиток

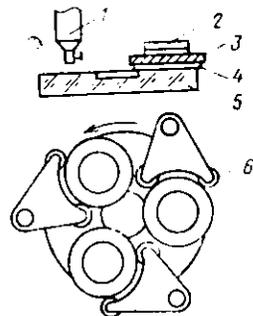


Рис. 2.5. Схема плоскошлифовального станка и расположение головок и абразивной суспензии:
1 — дозирующее устройство с абразивной суспензией; 2 — грузы; 3 — вилочка; 4 — пластина; 5 — шлифовальный диск; 6 — направляющий ролик

плоскости вращения алмазного диска и тем самым обеспечивает ориентированную резку.

Станок снабжен системой подачи воды для охлаждения режущего диска и вымывания отходов резки (частишек выкрошенного кремния).

Шлифовка и полировка. Поверхность пластины кремния, получаемых после резки, не удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к качеству поверхности в планарной технологии. Исследованиями на электронографе установлено наличие приповерхностных слоев, не имеющих монокристаллической структуры. Это механически нарушенные слои, возникающие в результате воздействия абразивного материала, и лежащие под ними слои с большими механическими напряжениями. Толщина нарушенного слоя после резки диском составляет 10...30 мкм в зависимости от скорости вращения диска. Поскольку в кремниевых микросхемах *p-n* переходы могут создаваться на глубине всего десятых долей микрометра, наличие нарушенных слоев с толщиной 10...30 мкм неприемлемо. Микронеровности на поверхности не должны превышать 0,02...0,1 мкм. Это выше требований 14 класса шероховатости поверхности, в то время как шероховатость поверхности пластины, отрезанных алмазным диском, соответствует только 7...8 классу. Кроме того, для качественного проведения процессов фотолитографии плоскостность пластин следует поддерживать на уровне ± 1 мкм по диаметру подложки (вместо 10 мкм после резки).

Для обеспечения требуемого качества поверхности пластины должны быть подвергнуты дальнейшей обработке. Эта обработка состоит в шлифовке и последующей полировке пластины. Шлифовка и полировка пластины производится на плоскошлифовальных прецизионных станках.

В зависимости от типа используемого микропорошка выбирается материал поверхности шлифовальника. При шлифовке пластины микропорошками М14...М5 применяют стеклянный шлифовальник, при полировке алмазными микропорошками — специальные шлифовальники с поверхностью из тканевых материалов. При обработке пластины на рабочий шлифовальник устанавливаются три головки с наклеенными пластинами. Головки удерживаются от перемещения по шлифовальнику специальными направляющими кронштейнами с опорными роликами (рис. 2.5). За счет силы трения, возникающей между соприкасающимися поверхностями рабочего шлифовальника и головок, последние получают вращение вокруг своих осей. Это вращение головок создает условия для более равномерного шлифования или полирования.

При шлифовании микропорошками М14...М5 используют водные суспензии с соотношением воды к абразиву 3:1. Поэтому в

станке для шлифовки предусмотрены мешалка для перемешивания абразивной суспензии и капельница для ее дозирования.

При полировке пластины алмазными микропорошками вместо водной суспензии не используются смеси, приготовленные на основе масла МВП, или специальные алмазные пасты.

В настоящее время принята определенная последовательность операций при механической обработке пластины (табл. 2.3). При этом учитывается, что толщина снимаемого слоя на каждой операции должна превышать толщину нарушенного слоя, образованного на предыдущей операции.

Таблица 2.3. Последовательность операций шлифовки и полировки кремния

| Тип микропорошка | Толщина нарушенного слоя, мкм | Скорость удаления материала, мкм/мин | Класс шероховатости поверхности |
|------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| М 14 | 20...30 | 3 | 7 |
| М 10 | 15...25 | 1,5 | 8...9 |
| АСМ 3/2 | 9...11 | 0,5...1,0 | 12...13 |
| АСМ 1/0,5 | 5...7 | 0,35 | 13 |
| АСМ 0,5/0,3 | <3 | 0,25 | 13...14 |
| АСМ 0,3/0,1 | <3 | 0,2 | 14 |

При изготовлении кремниевых микросхем пластины обычно шлифуются с двух сторон, а полируются только с рабочей стороны. В целом механическая обработка пластины, удовлетворяющих требованиям планарной технологии, приводит к большим потерям кремния (около 65%).

Важное значение имеет оптимизация процесса механической обработки с целью снижения временных затрат. Общее время обработки может быть снижено правильным выбором набора абразивных материалов и чела стадий обработки.

Резка подложек кремния производится и на заключительных стадиях технологического процесса изготовления микросхем при разделении их на кристаллы. Используются, в основном, три метода.

Метод скрайбирования состоит в нанесении на поверхности подложки кремния алмазным резцом-скрайбером рисок в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Ширина риски, включая область сколов, не превышает 30...50 мкм. Под рисками образуются напряженные области. При слабом механическом воздействии на такую подложку она разламывается по нанесенным рискам.

Алмазный резец может быть заменен лучом лазера. При воздействии мощного сфокусированного до 25 мкм лазерного излучения риски образуются не механическим воздействием, а испа-

рением узкой полосы кремния. Преимущества использования лазерного луча состоят в повышении скорости образования режки (100...200 мм/с вместо 30...50 мм/с для алмазного реза), отсутствии сколов и микротрещин, а недостаток — в необходимости защищать поверхность от частиц распыляемого кремния.

Разрезать подложки на кристаллы можно и алмазными дисками. Частота вращения диска около 20 000 об./мин. Ширина области разрезания 20...70 мкм.

2.4. ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЯ

Очистка поверхностей кремниевых подложек проводится с целью удаления остатков абразивного материала, жировых и прочих загрязнений, попавших на них на предыдущих стадиях обработки, и остатков травителей.

Очистку поверхности кремниевых подложек осуществляют химическими и физическими методами. В первом случае эффект достигается обработкой в растворителях и кислотах. При этом происходит превращение металлических примесей, окислов и жиров в растворимые в воде соединения, которые промывкой в воде легко удаляются с поверхности. Во втором случае разрыв связей между молекулами кремния и загрязнений достигается сообщением последним достаточной энергии для испарения, например нагревом или ионной бомбардировкой в плазме тлеющего разряда.

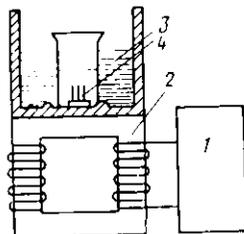
На этапе предварительной очистки поверхности подложек процесс ограничивается удалением загрязнений: подгравливание самого материала подложки исключается. При этом для очистки применяются материалы, удовлетворяющие следующим требованиям: они не должны вступать в химическую реакцию с кремнием; должны хорошо растворять жировые загрязнения и металлические примеси; по крайней мере один из них должен хорошо растворяться в воде. Материалы для очистки должны быть особо чистыми веществами¹. На окончательном этапе очистки с помощью газообразных травителей (газовое травление) стравливают приповерхностный слой кремния.

Последовательность технологических операций при очистке. В настоящее время разработаны и используются типовые технологические комплексы для очистки кремниевых подложек. Ниже приведена одна из возможных последовательностей технологических операций при очистке, проводимых после механической обработки и перед операцией термического окисления: 1) многократная ультразвуковая очистка и кипячение в органических раство-

¹ Марки ОСЧ (содержание примесей примерно на порядок меньше, чем в веществах марки АСЧ).

Рис. 2.6. Схема установки для ультразвуковой очистки:

1 — генератор ультразвуковых колебаний; 2 — магнитоэлектрик; 3 — ванна с водой; 4 — подложка кремния



лях и серной кислоте; 2) кипячение в азотной кислоте; 3) промывка в проточной деионизованной воде; 4) сушка на центрифуге; 5) кипячение в смеси азотной и соляной кислот в соотношении 1:3; 6) промывка в деионизованной воде; 7) промывка в плавиковой кислоте; 8) промывка в деионизованной воде; 9) кипячение в смеси гидроксида аммиака, перекиси водорода и воды в соотношении 2:1; 10) промывка в деионизованной воде с помощью кистей; 11) сушка на центрифуге.

Для повышения эффективности и скорости удаления загрязнений при химической очистке пластины кремния используется нагрев или ультразвуковое возбуждение очищающих материалов. Ультразвуковая очистка наиболее широко используется при обработке в растворителях. Схема установки для ультразвуковой очистки представлена на рис. 2.6. Ее основными узлами являются: генератор ультразвуковых колебаний; электромеханический преобразователь (вибратор), действие которого основано на явлении магнитоэлектрики и ванна с водой, непосредственно связанная с вибратором. В эту ванну помещается сосуд с растворителем и подложками. Механические вибрации воды передаются растворителю и подложкам. При этом вибрация способствует перемешиванию и, значит, ускоряет растворение загрязнений и удаление с поверхности подложек нерастворимых частиц различных материалов. Эффективность очистки зависит от частоты и мощности колебаний и типа растворителя.

На ультразвуковых установках обычно проводят очистку от остатков абразивных материалов и жировых загрязнений, используя в качестве растворителей трихлорэтилен, толуол, четыреххлористый углерод, ацетон. Для очистки от остатков органических веществ используют кипячение в серной кислоте. Для удаления атомов металлов применяют кипячение в соляной и азотной кислотах, промывку во фтористоводородной (плавиковой) кислоте. Окончательной операцией является промывка в деионизованной воде.

После механической обработки и очистки поверхности подложки кремния могут храниться достаточно долго. В этом случае их поверхности покрывают лаком, образующим при затверде-

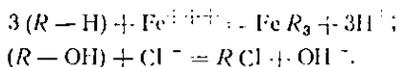
вани тонкую пленку, способную легко без разрушения отрываться от поверхности. При снятии этой пленки с поверхности подложки удаляется захваченная ею пыль.

Контроль чистоты поверхности — обязательная операция в технологическом процессе очистки. Есть несколько достаточно простых методов, позволяющих установить наличие загрязнений на поверхности кремниевых подложек. Один из них — микроскопическое исследование полированной поверхности подложек при косом освещении (исследование в темном поле). Луч света падает на поверхность подложки под малым углом, так что отраженные лучи не попадают в объектив. Чистая поверхность подложки — темная, видны только загрязнения в виде ярких точек, на которых рассеивается свет, попадая частично в объектив.

Другой метод — обнаружение масел и жиров при опрыскивании подложек водой. Чистая поверхность кремния обычно равномерно гидрофильна или равномерно гидрофобна, т. е. тонкая пленка воды покрывает полностью поверхность или собирается в одну-две капли. Загрязнение поверхности приводит к тому, что пленка воды разрывается на значительное число капель, не имеющих тенденции соединяться в сплошную пленку или собираться в одну-две большие капли.

Вода в технологических процессах очистки. На различных этапах очистки используется дистиллированная, бидистиллированная и деионизованная вода. Дистиллированную воду получают перегонкой обычной водопроводной воды. Ее удельное сопротивление составляет около 200 кОм·см. Бидистиллированную воду получают повторной перегонкой дистиллированной воды. Ее удельное сопротивление возрастает до 500 кОм·см, а при использовании для перегонки кварцевой системы до 10 МОм·см. На окончательных этапах очистки используют деионизованную воду с удельным сопротивлением до 20 МОм·см.

Деионизованная вода получается при пропускании дистиллированной воды через ионообменные смолы, которые разделяются на два класса: катиониты (поглощают ионы металлов) и аниониты (поглощают ионы кислотных остатков). Химическая формула катиона $R-H$, где R — органический радикал, химическая формула аниона $R-OH$. Реакции при очистке, например, от $FeCl_3$ происходят по следующей схеме:



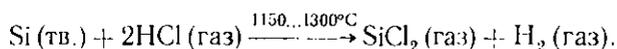
Ионы железа и хлора связываются с органическими радикалами, а вновь образовавшиеся ионы являются составляющими воды.

Необходимо учитывать, что деионизованная вода содержит органические частицы, которые могут стать источником загрязнения поверхности подложки. Для их устранения деионизованная вода фильтруется мембранными фильтрами из тонких пленок нитроцеллюлозы, нейлона и других материалов, обеспечивающих размеры отверстий от долей до нескольких микрометров.

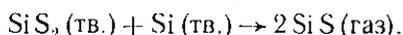
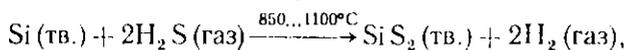
Очистка поверхности газовым травлением. В последнее время в планарной технологии широко используется газовое травление пластин кремния как метод окончательной очистки их поверхности. Помимо удаления загрязнений с поверхности происходит травление слоя кремния с механическими нарушениями.

Газовое травление обычно используется в тех технологических процессах, в которых особо важную роль играет структура поверхностного слоя, например при эпитаксиальном наращивании или при получении тонкого подзатворного слоя SiO_2 в МОП-структурах.

В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с галогенами (фтор, хлор, бром), с галогеноводородами (HF , HCl), с сероводородом H_2S , гексафторидом серы SF_6 . Молярное содержание этих веществ в водороде или гелии может изменяться от десятых долей до единиц процентов. Обработка осуществляется при температурах $800 \dots 1300^\circ\text{C}$ в установках для окисления либо непосредственно в реакторах для эпитаксиального наращивания. При травлении кремния в HCl происходит следующая реакция:



Аналогичны реакции при травлении кремния в HF . При травлении сероводородом идут реакции:



Продуктами реакции при газовом травлении являются только газообразные вещества, чем и обусловлена высокая эффективность очистки поверхности.

Прогрессивным методом очистки является ионно-плазменное травление. Этот метод будет рассмотрен в гл. 7.

2.5. ТРАВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Травление подложек кремния происходит на границе твердой и жидких сред и рассматривается как гетерогенная реакция. Процесс травления состоит из пяти стадий: 1) диффузия реагента к поверхности; 2) адсорбция реагента; 3) химическая реакция; 4) десорбция продуктов реакции; 5) диффузия продуктов реакции от поверхности.

Скорость всего процесса определяется скоростью наиболее медленной (контролирующей) стадии. При травлении кремния контролирующими стадиями могут быть либо диффузия реагентов к поверхности, либо химическая реакция.

Скорость диффузии реагента в соответствии с законом Фика может быть представлена как

$$v_d = -D \frac{N_{об} - N_{пов}}{\delta},$$

где $N_{об}$ и $N_{пов}$ — концентрации реагента соответственно в объеме и на поверхности; δ — толщина приповерхностного слоя, в котором существует градиент концентрации.

Скорость химической реакции описывается выражением

$$v_p \sim (N_A)^a (N_B)^b \exp\left(-\frac{\Delta\omega}{RT}\right),$$

т. е. пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ N_A и N_B и экспоненциально зависит от энергии активации $\Delta\omega$ и температуры T ; R — универсальная газовая постоянная. Величины a и b для простых реакций равны коэффициентам перед формулами веществ в уравнении реакции. Энергия активации — это избыточная энергия (по сравнению со средней), которой должна обладать молекула в момент столкновения, чтобы быть способной к химическому взаимодействию. При увеличении энергии активации влияние температуры на скорость реакции возрастает.

Энергия активации, определяющая скорость процесса диффузии в жидкостях $\Delta\omega_d$, составляет 1...10 ккал/моль; энергия активации химических реакций для различных травителей — 1...1000 ккал/моль. В зависимости от соотношения $\Delta\omega$ и $\Delta\omega_d$ контролирующей стадией является либо химическая реакция ($\Delta\omega > \Delta\omega_d$), либо диффузия ($\Delta\omega < \Delta\omega_d$).

В первом случае скорость травления чувствительна к состоянию поверхности, поскольку энергия активации химической реакции в большой мере зависит от ее неоднородности. Так, полированная поверхность имеет меньшие значения $\Delta\omega$, чем полированная. Энергию активации снижают дислокации и другие дефекты кристалла. Поскольку различные кристаллографические плоскости имеют различные значения $\Delta\omega$, то скорость травления зависит от ориентации подложек. Скорость травления зависит также от температуры. Травители, для которых контролирующей стадией является химическая реакция, называются селективными.

Во втором случае (контролирующая стадия — диффузия) скорость травления нечувствительна к неоднородностям поверхности, слабее зависит от температуры, однако резко зависит от факторов, влияющих на скорость диффузии, например от перемешивания травителя, его вязкости. Травители, для которых контролирующей стадией является диффузия, называются полирующими.

К типичным полирующим травителям для кремния относятся

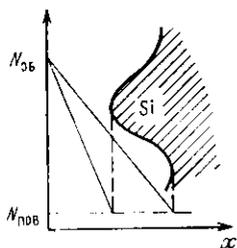


Рис. 2.7. Сглаживание поверхностного рельефа

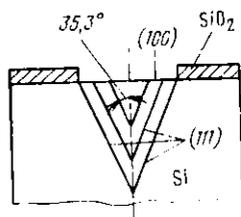
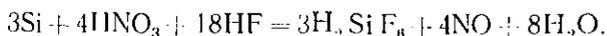


Рис. 2.8. Получение V-образных областей при локальном анизотропном травлении кремния

смеси азотной и плавиковой кислот. Химическая реакция характеризуется низкими значениями (около 4 ккал/моль) энергии активации. Травление кремния происходит в соответствии с электрохимической теорией растворения, согласно которой результирующее уравнение, описывающее растворение кремния в смеси азотной и плавиковой кислот, имеет вид



Если травитель перемещается параллельно поверхности кремния, то создается устойчивый по толщине пограничный слой, в котором имеется градиент концентрации. Вследствие более высокого градиента концентрации выступы на поверхности травятся быстрее впадин (рис. 2.7). Эффективность сглаживания поверхностного рельефа повышается при электролитическом травлении, когда на кремний подается положительное смещение. Электролит содержит плавиковую кислоту и компонент, регулирующий вязкость, например глицерин. Образуется вязкий приповерхностный слой. Толщина и сопротивление слоя зависят от состава электролита и скорости его перемещения. При определенной плотности тока проходит процесс анодного растворения кремния, получивший название электрополировки.

В качестве примеров селективных травителей для кремния можно назвать водные растворы щелочей и гидразин гидрат $(\text{NH}_2)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Химические реакции для этих травителей имеют высокие энергии активации: 13 ккал/моль для 10%-ного раствора NaOH и (6...10) ккал/моль для гидразин гидрата. Для селективных травителей характерна большая разница в скоростях травления различных кристаллографических плоскостей. Так, в названных травителях плоскости (100) травятся в несколько десятков раз быстрее плоскостей (111). Поэтому травление в таких травителях иногда называют анизотропным. Анизотропное

травление широко применяется в технологии микросхем для создания изолирующих областей. Представленные на рис. 2.8 V-образные области получаются при локальном травлении подложек, ориентированных по плоскости (100). Для маскирования используется пленка двуокиси кремния. Границы окон в пленке следует располагать по направлению пересечения плоскостей (111) с поверхностью, т. е. по направлению [110]. Каждую плоскость (100) пересекает целый ряд плоскостей (111). Анизотропный травитель растворяет плоскость (100) до тех пор, пока не выявятся плоскости (111), начинающиеся у краев окна в пленке SiO₂. Точность углов между плоскостями (в данном случае угол, образованный плоскостями (111) с вертикалью, составляет 35,3°) позволяет получить углубление строго определенной формы.

Глава 3. ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ

3.1. ВВЕДЕНИЕ

Легирование кремния различными примесями проводится с целью изменения его электрофизических свойств — типа электропроводности, удельного сопротивления, времени жизни носителей заряда. В планарной технологии кремний легируется двумя методами — диффузией примесей и внедрением ускоренных ионов примеси.

Процесс диффузии описывается двумя уравнениями, носящими названия первого и второго законов Фика.

Первое уравнение имеет вид:

$$J = - \mathcal{D} \text{grad } N, \quad (3.1)$$

где N — концентрация атомов примеси; J — плотность потока атомов, т. е. количество атомов, проходящих за единицу времени через единичную площадь. Этот закон устанавливает, что при наличии в какой-либо среде неравномерного распределения атомов примеси (градиента концентрации) возникает направленный диффузионный поток атомов, стремящийся выравнять концентрацию. Коэффициент пропорциональности \mathcal{D} носит название коэффициента диффузии.

Второе уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mathcal{D} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \right). \quad (3.2)$$

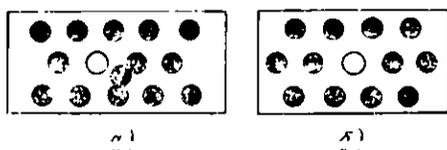


Рис. 3.1. Точечные дефекты в кристаллах:

а - по Френкелю; б - по Шоттки

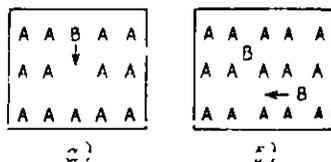


Рис. 3.2. Механизмы диффузии примесей в кристалле полупроводника:

а - вакансионный; б - междуузельный

Для реальных полупроводниковых кристаллов характерно наличие нарушений регулярного расположения атомов кристаллической решетки. Обусловлено это нарушением присутствием атомов примеси и дефектов роста монокристаллов: двойников, дислокаций, микротрещин. Однако кроме этих нарушений есть дефекты, которые присущи самой природе кристаллического тела и поэтому содержатся в любом кристалле. Атом кристаллической решетки может приобрести энергию, существенно превышающую среднюю кинетическую энергию атомов, преодолеть потенциальный барьер, созданный окружающими атомами, переместиться из своего первоначального равновесного состояния в другое. При этом, если все ближайшие узлы кристаллической решетки заняты, то он может разместиться только в междуузлии. Таким образом, одновременно образуется свободный узел — вакансия — и атом в междуузлии (рис. 3.1,а). Дефекты такого типа принято называть дефектами по Френкелю. Атомы, расположенные на поверхности кристалла, в результате приобретения высокой энергии могут оторваться от поверхности. При этом на поверхности возникают вакансии, способные перемещаться вглубь кристалла. Дефекты в виде свободных узлов (вакансии) называют дефектами по Шоттки (рис. 3.1,б).

Наличие точечных дефектов в виде вакансий лежит в основе процессов диффузии в полупроводниках.

Атомы элементов III и V групп периодической системы диффундируют в кремнии в соответствии с вакансионным механизмом диффузии, т. е. перемещаются в кристалле полупроводника, занимая места вакансий (рис. 3.2,а). Эти атомы примесей образуют твердые растворы замещения.

Для примесей других групп периодической системы, например I, VIII, характерен другой механизм диффузии — междуузельный. Он сводится к последовательному переходу атомов примеси из одного междуузлия в другое (рис. 3.2,б). Атомы примесей, располагаясь в междуузлиях, образуют твердые растворы внедрения. Атомы некоторых элементов могут диффундировать одновременно и по междуузлиям, и по вакансиям.

Рассмотренные механизмы диффузии приводят к образованию твердых растворов замещения и внедрения, но практически не изменяют природу самого кремния. Однако в ряде случаев введение атомов примеси в полупроводник приводит к возникновению в области диффузии нового химического соединения со структурой и физическими свойствами, отличными от свойств исходного полупроводника. В частности, диффузией кислорода обусловлен процесс термического окисления кремния, широко используемый в планарной технологии.

Коэффициент диффузии характеризует скорость диффузионного процесса и экспоненциально зависит от его температуры. Для вакансионного механизма диффузии $\mathcal{D} = \mathcal{D}_0 \exp[-(\omega + \omega')/kT]$, где величина $\omega + \omega'$, называемая энергией активации процесса диффузии, зависит от химической связи атомов в кристалле. Таким образом, основные диффузионные параметры — энергия активации и коэффициент \mathcal{D}_0 — определяются природой полупроводникового материала и диффундирующей примеси.

3.2. РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДИФфуЗИИ

При создании микроселектронных схем необходимо иметь сведения о распределении концентрации примеси, о глубине ее проникновения. Эти данные могут быть получены из решения уравнения диффузии, соответствующего второму закону Фика. Решение этого уравнения получено при следующих предположениях: задача одномерная; коэффициент диффузии не зависит от концентрации диффундирующих частиц, что достаточно справедливо для кремния, в котором предельные растворимости вводимых примесей низки; диффузия происходит в полуограниченном теле; начальное распределение примеси в момент $t=0$ соответствует функции $N(x, 0)$. Решение зависит от условий на границе $x=0$.

В зависимости от граничных условий плоскость $x=0$ может представлять собой либо отражающую, либо связывающую границу. Плоскость $x=0$ является отражающей, или непроницаемой для вещества, если поток диффундирующих частиц через нее отсутствует; т. е. $J(0, t) = -\mathcal{D}(\partial N/\partial x)|_{x=0} = 0$. Плоскость $x=0$ является связывающей, если в любой момент времени, отличный от нуля, концентрация примеси в этой плоскости равна нулю, т. е. $N(0, t)|_{t \neq 0} = 0$.

Решение уравнения диффузии для полуограниченного тела с отражающей границей

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \mathcal{D}t}} \int_0^{\infty} N(\xi, 0) \left\{ \exp\left[-\frac{(\xi-x)^2}{4\mathcal{D}t}\right] + \exp\left[-\frac{(\xi+x)^2}{4\mathcal{D}t}\right] \right\} d\xi; \quad (3.3)$$

со связывающей границей —

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi \mathcal{D}t}} \int_0^{\infty} N(\xi, 0) \left\{ \exp \left[-\frac{(\xi - x)^2}{4\mathcal{D}t} \right] - \exp \left[-\frac{(\xi + x)^2}{4\mathcal{D}t} \right] \right\} d\xi. \quad (3.4)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

Диффузия из ограниченного источника. Примером диффузии из ограниченного источника примеси является диффузия из конечного слоя. Начальное распределение концентрации задается в виде

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_s & \text{для } 0 \leq x \leq h; \\ 0 & \text{для } h \leq x \leq \infty, \end{cases}$$

т. е. в слое толщиной h концентрация примеси всюду постоянна и равна N_s , за пределами слоя — равна нулю. Решение уравнения диффузии есть

$$N(x, t) = \frac{N_s}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{\mathcal{D}t}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{\mathcal{D}t}} \right). \quad (3.5)$$

Распределение примеси для этого случая представлено на рис. 3.3.

Поверхностная концентрация убывает со временем: $N(0, t) = N_s \operatorname{erf}(h/2\sqrt{\mathcal{D}t})$. Для $x < \mathcal{D}t/h$ и $t > h^2/\mathcal{D}$ решение (3.5) приближенно можно выразить в виде функции Гаусса $N(x, t) = (Q/\sqrt{\pi \mathcal{D}t}) \exp(-x^2/4\mathcal{D}t)$, где $Q = N_s h$ — общее количество атомов диффундирующего вещества в слое толщиной h , отнесенное к единице площади.

Диффузия из неограниченного источника. В данном случае на границе полуограниченного тела в плоскости $x=0$ поддерживается постоянная, не зависящая от времени концентрация примеси N_s . Начальное и граничное условие задается в виде

$$N(0, t)|_{t \neq 0} = N_s; \quad N(0, 0) = 0.$$

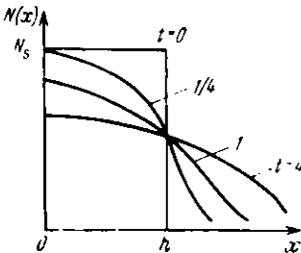


Рис. 3.3. Распределение примеси при диффузии из ограниченного источника

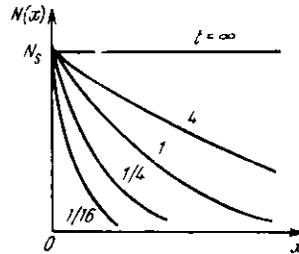


Рис. 3.4. Распределение примеси при диффузии из неограниченного источника

Решение этой задачи сводится к решению задачи о диффузии в теле со связывающей границей: вводится новая функция $N(x, t) = N_s - N(x, t)$, где $N(x, t)$ — искомое решение. Эта функция удовлетворяет граничному условию $N(0, t) = 0$ для $t > 0$, характеризующему связывающую границу, и начальному условию $N(x, 0) = N_s$. Следовательно, для функции $N(x, t)$ выполняется соотношение (3.4), которое для равномерного распределения примеси, когда $N(\xi, 0) = N_s$, можно преобразовать к виду $N(\xi, 0) = N_s \operatorname{erf}(x/2\sqrt{\mathcal{D}t})$. Отсюда $N(x, t)$ соответствует дополнительной функции ошибок $N(x, t) = N_s \cdot N(x, t) = N_s [1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{\mathcal{D}t})]$. Распределение концентрации примеси для неограниченного источника дано на рис. 3.4.

Многостадийная диффузия. Если процесс диффузии проводится в несколько стадий, а граничные условия на всех стадиях сохраняются одинаковыми, то результирующее распределение примеси будет соответствовать закону, характерному для этих граничных условий, однако величина $\mathcal{D}t$ возрастает и будет равна $\mathcal{D}_1 t_1 + \mathcal{D}_2 t_2$, где индексы 1 и 2 относятся к двум стадиям процесса.

При изготовлении структур элементов микросхем требуется определенное сочетание толщины диффузионного слоя и концентрации примеси в слое, в частности на его поверхности. Не всегда требуемое сочетание можно получить, используя какой-то один из рассмотренных примеров диффузии. В таких случаях процесс диффузии проводят в две стадии, изменяя граничные условия при переходе от одной стадии к другой.

Примером может служить технологический процесс получения базовой области транзистора, в котором происходит накопление примеси в первой стадии, а затем ее перераспределение во второй. В первой стадии диффузия проводится из неограниченного источника, при этом создается тонкий диффузионный слой с высокой поверхностной концентрацией. Распределение примеси в этом слое соответствует дополнительной функции ошибок. Во второй стадии диффузия проводится из ограниченного источника (из конечного слоя с неоднородным распределением примеси). При этом происходит снижение поверхностной концентрации (что характерно для диффузии из ограниченного источника) и увеличение глубины проникновения примеси.

Результирующее распределение примеси соответствует функции Гаусса. Однако в данном случае количество атомов примеси в конечном слое, созданном за время первой стадии процесса на единицу поверхности Q , следует определять из соотношения

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt, \quad (3.6)$$

а не из соотношения $Q = N_s h$, справедливого для однородного распределения примеси в слое.

С учетом того, что плотность потока примеси через поверхность

$$J(t) = -\mathcal{D} \frac{dN}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{\mathcal{D} N_s}{\sqrt{\pi \mathcal{D} t}} \exp\left(-\frac{x}{2\sqrt{\mathcal{D} t}}\right)^2 \Big|_{x=0} = \frac{N_s \sqrt{\mathcal{D}}}{\sqrt{\pi t}}, \quad (3.7)$$

количество атомов примеси, поступившее в полуограниченное тело за время t_1 , согласно (3.6) будет определяться выражением

$$Q = \frac{2N_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\mathcal{D} t_1}. \quad (3.8)$$

Локальная диффузия. Если диффузия осуществляется не по всей плоскости $x=0$, а только на локальных ее участках, то полученные одномерные решения для различных диффузионных задач не могут быть использованы. Примером локальной диффузии могут служить все диффузионные процессы, проводимые в планарной технологии, когда примесь проникает в полупроводник только на участках, не защищенных маскирующей пленкой. При локальной диффузии необходимо решать трехмерное уравнение Фика (3.2).

Если диффузия проводится через отверстие в маскирующей пленке, имеющее вид узкой (в направлении y), но длинной (в направлении z) полосы, то в этом случае можно решать двумерное уравнение

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \mathcal{D} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right).$$

Эти уравнения решены численными методами. Полученные решения показывают, что на расстояниях от края маскирующего покрытия, больших $4\sqrt{\mathcal{D}t}$, глубина проникновения примеси практически не отличается от полученной для одномерного случая. Если ширина полосы, в которую проводится диффузия, меньше $4\sqrt{\mathcal{D}t}$, то глубина проникновения примеси существенно меньше по сравнению с одномерной диффузией.

В результате боковой диффузии примесь проникает под защитную маску. Если внедряется примесь, изменяющая тип проводимости, то образующийся при диффузии p - n переход оказывается защищенным от воздействия окружающей среды, что является основной особенностью планарных структур.

3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФFUZАНТОВ

Диффузантами называют те примеси, которые вводят в полупроводник в процессе диффузии. В настоящее время исследована диффузия многих примесей в кремний, германий, арсенид галлия и другие полупроводники. Для кремния все диффузаны принято разделять на две группы: 1) примесные элементы III и V групп периодической системы, которые резко изменяют проводимость кремния и 2) примесные элементы I и VIII групп, которые создают в запрещенной зоне кремния глубоко лежащие уровни захвата или рекомбинации и изменяют время жизни носителей заряда.

Рассмотрим некоторые характеристики диффузантов. В числе первых характеристик обычно называют *коэффициент диффузии*. Графики зависимости коэффициентов диффузии от температуры для элементов V группы (доноров) и элементов III группы (акцепторов) представлены соответственно на рис. 3.5 и 3.6.

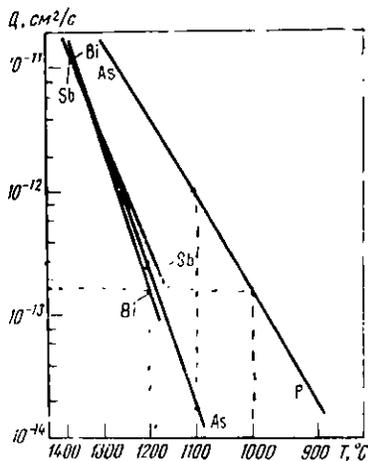


Рис. 3.5. Зависимости коэффициентов диффузии доноров в кремнии от температуры

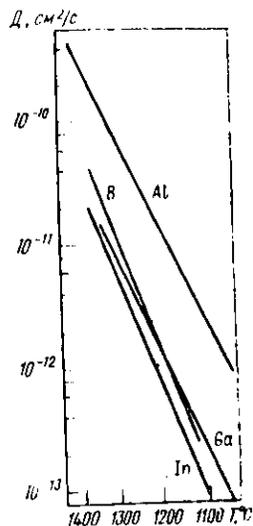


Рис. 3.6. Зависимости коэффициентов диффузии акцепторов в кремнии от температуры

Экспериментальные исследования показали, что в ряде случаев коэффициенты диффузии не остаются постоянными в процессе диффузии, а полученные распределения концентрации примеси не соответствуют теоретическим. Это несоответствие теоретических и экспериментальных результатов объясняется концентрационной зависимостью коэффициентов диффузии. Такая зависимость возникает под влиянием внутреннего электрического поля, обусловленного диффузией в полупроводнике ионизованной примеси. В результате одновременно происходит и диффузия свободных носителей заряда, образованных при ионизации примеси. Электрическое поле препятствует разделению зарядов и удерживает свободные носители вблизи ионов. За счет возникновения внутреннего электрического поля при высокой концентрации вводимой примеси может происходить удвоение коэффициента диффузии.

На рис. 3.7 показана экспериментально полученная зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремнии от поверхностной концентрации примеси N_s при температуре 1300 °C. Как видно удвоение коэффициента диффузии происходит при концентрации 10^{20} см⁻³, а изменение его начинается при значительно более низких концентрациях. Объяснить эти зависимости в области концентраций $10^{20} \dots 10^{21}$ см⁻³ только влиянием электрического поля невозможно. Для их объяснения можно привлечь эффект возник-

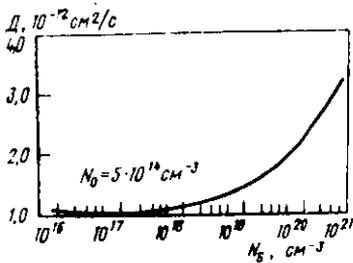


Рис. 37. Экспериментальная зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремнии от поверхностной концентрации

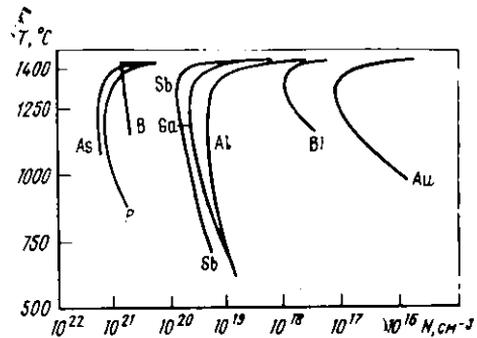


Рис. 38. Растворимость примесей в твердом кремнии

поведения при высоких концентрациях примеси дислокаций и дополнительных вакансий.

Другой важной характеристикой диффузантов является их растворимость в кремнии. Существует определенная взаимосвязь между коэффициентами диффузии и растворимостями диффузантов. Эта взаимосвязь обусловлена тем, что и диффузия и растворимость определяются одними и теми же факторами, а именно концентрацией вакансий и энергией связи примесных атомов в вакансиях.

Если энергия связи примесных атомов велика, то они устойчивее в вакансиях, и коэффициент диффузии мал. Растворимость примесных атомов в данном случае велика, поскольку растет вероятность их нахождения в вакансиях. С другой стороны, диффузантам с большими коэффициентами диффузии свойственна малая растворимость. Кривые солидуса, характеризующие растворимость в твердом кремнии, представлены на рис. 3.8.

Используя данные по распределению примесей (§ 3.2) и характеристики диффузантов (§ 3.3) можно провести расчеты диффузионных процессов в одномерном приближении, например для изготовления транзисторных структур.

Пример. Рассчитать технологические режимы создания транзисторной структуры $n-p-n$ типа со следующими характеристиками: 1) диффузанты — бор и фосфор; 2) поверхностные концентрации в базе и эмиттере соответственно $N_{s, \lambda} = 2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и $N_{s, \delta} = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3) концентрация в коллекторе $N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; 4) глубины залегания коллекторного и эмиттерного переходов соответственно $x_k = 3 \text{ мкм}$ и $x_e = 2 \text{ мкм}$; 5) поверхностная концентрация бора в процессе загонки — $8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Базовая область транзистора создается в два этапа — загонка бора и его разгонка в окисляющей среде для одновременного выращивания пленки SiO_2 , выступающей в качестве маски при создании эмиттера диффузией фосфора. При диффузии фосфора продолжается разгонка бора. Следовательно, второй этап создания базы представляет собой два процесса, происходящие при различных температурных и временных режимах. Рассматриваемая структура описывается следующей системой уравнений:

1) на поверхности базовой области

$$N_{sA} = \frac{Q}{\sqrt{\pi \mathcal{D}t}}, \quad \text{где } \mathcal{D}t = \mathcal{D}_p t_p + \mathcal{D}_{b_0} t_{b_0}.$$

$\mathcal{D}_p t_p$ и $\mathcal{D}_{b_0} t_{b_0}$, соответственно характеризуют разгонку бора в окислительной среде и в процессе эмиттерной диффузии;

2) на границе коллекторного перехода

$$N_0 = \frac{Q}{\sqrt{\pi \mathcal{D}t}} \exp\left(-\frac{x_k^2}{4 \mathcal{D}t}\right);$$

3) на границе эмиттерного перехода

$$N_0 + N_{sA} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_0}{2 \sqrt{\mathcal{D}_0 t_0}}\right) = N_{sA} \exp\left(-\frac{x_0^2}{4 \mathcal{D}t}\right);$$

4) при загонке бора

$$Q = \frac{2N_{sA}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\mathcal{D}_0 t_0}.$$

Из уравнений 1) и 2) определяются $\mathcal{D}t$ и Q :

$$\exp\left(-\frac{x_k^2}{4 \mathcal{D}t}\right) = \frac{N_0}{N_{sA}} = \frac{10^{16}}{2 \cdot 10^{18}} = 5 \cdot 10^{-3}; \quad \frac{x_k^2}{4 \mathcal{D}t} = 5,3 \text{ см}^2;$$

$$\mathcal{D}t = 4,2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2;$$

$$Q = N_{sA} \sqrt{\pi \mathcal{D}t} = 2 \cdot 10^{18} \cdot 1,77 \sqrt{4,2 \cdot 10^{-9}} \text{ см}^{-2};$$

$$Q = 2,3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Из уравнения 3) определяется $\mathcal{D}_0 t_0$ и $\mathcal{D}_p t_p$:

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{2 \sqrt{\mathcal{D}_0 t_0}}\right) = 1 - \frac{N_0}{N_{sA}} - \frac{N_{sA}}{N_{sD}} \exp\left(-\frac{x_0^2}{4 \mathcal{D}t}\right);$$

$$\exp\left(-\frac{x_0^2}{4 \mathcal{D}t}\right) = \exp\left(-\frac{4 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 4,2 \cdot 10^{-9}}\right) = \exp(-2,38) = 0,092;$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x_0}{2 \sqrt{\mathcal{D}_0 t_0}}\right) = 1 - \frac{10^{16}}{8 \cdot 10^{20}} - \frac{2 \cdot 10^{18}}{8 \cdot 10^{20}} \cdot 0,092 = 0,99977;$$

$$\frac{x_0}{\sqrt{D_0 t_0}} = 2,57; \quad D_0 t_0 = \left(\frac{2 \cdot 10^{-4}}{2,57 \cdot 2} \right)^2 = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2.$$

При условии, что коэффициенты диффузии бора и фосфора совпадают, получаем

$$D_p t_p = (4,2 - 1,5) \cdot 10^{-9} \text{ см}^2 = 2,7 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2.$$

Из уравнения 4) определяется $D_0 t_0$

$$\sqrt{D_0 t_0} = \frac{Q\sqrt{\pi}}{2N_{03}} = \frac{2,3 \cdot 10^{14} \cdot 1,77}{2,8 \cdot 10^{16}} = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ см};$$

$$D_0 t_0 = 6,4 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2.$$

Конкретные значения температуры и длительности процессов выбираются с учетом необходимости точного контроля времени и максимальной температуры диффузионной установки. Для загонки бора при $t=30$ мин $T=950^\circ\text{C}$, для разгонки бора при $t=60$ мин $T=1200^\circ\text{C}$, для диффузии фосфора при $t=60$ мин $T=1080^\circ\text{C}$.

3.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ДИФФУЗИИ

С тех пор как метод диффузионного введения примесей в полупроводник был впервые использован для создания p и n переходов, и до настоящего времени идет постоянное его совершенствование. Оно направлено на повышение воспроизводимости основных параметров диффузионных слоев — поверхностной концентрации примесей и толщины, на расширение диапазона их регулирования, а также на общее снижение стоимости проводимых процессов. Сейчас разработано уже достаточно большое число различных способов проведения диффузии. Здесь будет рассмотрен нашедший наибольшее распространение в планарной технологии процесс диффузии донорных и акцепторных примесей в кремнии в потоке газа-носителя (или по способу открытой трубы). В ка-

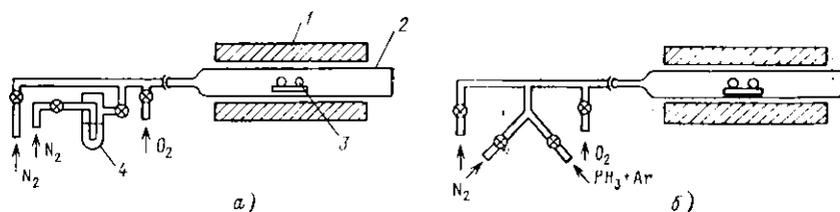


Рис. 3.9. Схемы установок диффузии в потоке газа-носителя для жидких (а) и газообразных (б) источников примеси:

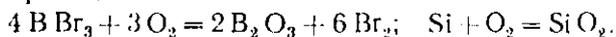
1 — трубочатая печь; 2 — кварцевая труба; 3 — подложки; 4 — сосуд с жидким источником примеси

честве источников диффузантов могут использоваться жидкие и газообразные вещества.

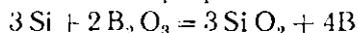
Схема установки соответственно для жидких и газообразных источников примеси представлена на рис. 3.9,а, б. При использовании жидких источников примеси, которыми обычно служат галогениды, установка для диффузии имеет одну высокотемпературную зону (рис. 3.9,а). Для испарения жидкого источника примеси достаточно поддерживать его температуру в интервале 20... 40 °С. Наиболее широкое применение нашли галогениды бора и фосфора, в частности треххлористый фосфор PCl_3 , хлорокись фосфора $POCl_3$ и трехбромистый бор BBr_3 .

В кварцевую трубу направляются три потока газа: основной поток азота (или аргона) со скоростью 1000 см³/мин, слабый поток (около 10 см³/мин) такого же газа, предварительно прошедший через жидкий источник, и слабый поток кислорода (около 15 см³/мин). При использовании жидких источников наличие кислорода в составе газа-носителя имеет принципиальное значение, поскольку приводит к образованию оксидов примеси.

Так, для BBr_3 в зоне диффузии проходят следующие химические реакции:

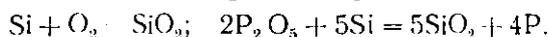
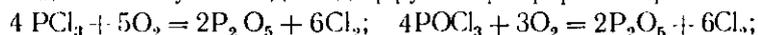


При взаимодействии тонкой пленки SiO_2 с B_2O_3 образуется соединение типа $mB_2O_3 \cdot nSiO_2$ (боросиликатное стекло). На поверхности Si при реакции



происходит выделение диффундирующего в Si элементарного бора.

Аналогичные реакции происходят для соединений PCl_3 и $POCl_3$, используемых для диффузии фосфора в кремний:

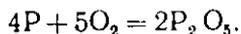
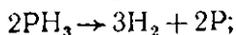


Рассмотренные химические реакции сопровождаются образованием галогенов (Cl, Br), способных травить поверхность кремния. При достаточном содержании кислорода в газовом потоке (более 7... 10%) травление кремния предотвращается ростом пленки SiO_2 .

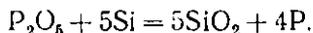
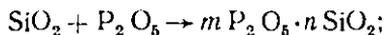
Недостаток диффузии из жидких источников состоит в том, что и сами источники и продукты реакции являются отравляющими веществами.

Кроме жидких могут использоваться также и газообразные источники — обычно гидриды примесей, например фосфин PH_3 , диборан B_2H_6 , арсин AsH_3 . Схема установки представлена на рис. 3.9,б. При диффузии из фосфина в качестве газа-носителя может

использоваться смесь PH_3 , Ar и O_2 . В атмосфере реакционной камеры происходит разложение фосфина при температурах выше 440°C и образование оксида фосфора:



На поверхности кремния проходят реакции $\text{Si} + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$;



Положительной особенностью диффузии из газообразных источников является возможность достаточно просто регулировать поверхностную концентрацию в широких пределах — изменением содержания гидридов в инертном газе. Недостаток метода — в точности газообразных источников.

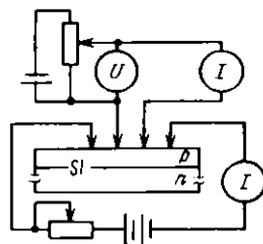
3.5. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ

К основным параметрам диффузионных слоев относятся поверхностное сопротивление слоя, глубина, на которой образуется p - n переход, концентрация примеси на поверхности. Поверхностное сопротивление слоя измеряется четырехзондовым методом. На поверхности кремния по прямой линии располагают четыре зонда на равных расстояниях друг от друга. Через внешние зонды пропускается ток, внутренние служат для измерения падения напряжения компенсационным методом.

Схема измерения представлена на рис. 3.10. Если диффузионный слой имеется только с одной стороны подложки и его можно рассматривать в определенном приближении как слой бесконечно малой толщины и неограниченных размеров, то падение напряжения между средними зондами

$$U = \frac{JR_s}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{s} - \ln \frac{s}{2s} \right) = 4,53 JR_s,$$

Рис. 3.10. Схема измерения сопротивления слоя четырехзондовым методом



где R_s — поверхностное сопротивление слоя (сопротивление квадрата площади слоя), Ом/□, s — расстояние между зондами. В том случае, когда слой имеет ограниченные размеры, численный коэффициент рассчитывается исходя из конкретной геометрии образца.

Для определения глубины расположения p - n перехода наиболее распространен метод, суть которого состоит в изготовлении косого, шарового или цилиндрического шлифов на кремниевой пластине с последующим воздействием на область шлифа химических реагентов, способных различно окрашивать полупроводники электронной и дырочной проводимости (метод декорирования). Различие в окрашивании может происходить либо из-за различной скорости прохождения химической реакции, либо вследствие осаждения металлов только на одну из областей p - n перехода. Последнее обусловлено разницей электрохимических потенциалов полупроводников различного типа проводимости. Химическим окрашиванием можно установить расположение не только p - n переходов, но и переходов типа n^+ - n и p^+ - p .

Изготовление шлифов под небольшими углами ($1 \dots 5^\circ$) позволяет расширить исследуемую диффузионную область. Поперечные сечения образцов с косым и шаровым шлифами представлены на рис. 3.11,а,б. Глубина расположения p - n перехода d_0 при изготовлении косого шлифа под углом α и шарового (при условии $2R \gg x$ и $2R \gg d_0$, рис. 3.11,б) определяется соответственно как

$$d_0 = d \operatorname{tg} \alpha; \quad d_0 = \frac{\mathcal{D}^2 - d}{4} \cdot \frac{1}{2R} = \frac{l^2}{2R}.$$

Наиболее распространен декодирующий раствор, состоящий из концентрированной плавиковой кислоты HF и 0,1% азотной кислоты HNO₃. При нанесении этого травителя на шлиф области p -типа темнеют, цвет областей n -типа остается неизменным. В качестве травителя может использоваться и чистая HF, но в этом случае шлиф необходимо интенсивно освещать.

Для определения поверхностной концентрации диффузионного слоя четырехзондовым методом измеряют поверхностное сопротивление слоя R_s и глубину залегания p - n перехода d_0 , что позволяет определить усредненную удельную проводимость. Зная ее, рассчитывают поверхностную концентрацию, исходя из соотношения

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{R_s d_0} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} q \mu(N) [N(x) - N_0] dx,$$

где $N(x)$ — распределение примеси в диффузионном слое. Этот

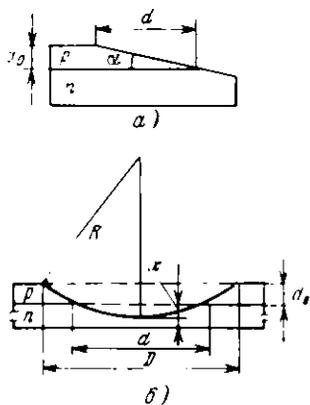


Рис. 3.11. Поперечные сечения пластины с косым (а) и шаровым (б) шлифами:

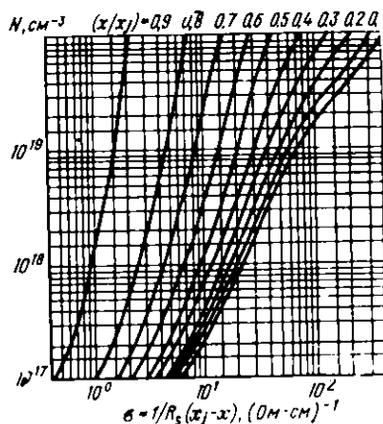


Рис. 3.12. Расчетные кривые, характеризующие концентрацию примеси в диффузионном слое с распределением примеси по закону $N(x, t) = N_0 / \sqrt{\pi D t} \exp(x^2 / 4 D t)$, для $N_0 = 10^{16} \text{ см}^{-3}$

расчет выполнен на ЭВМ для двух законов распределения по дополнительной функции ошибок

$$N(x) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2 \sqrt{D t}}$$

и функции Гаусса

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D t}\right)$$

для различных концентраций примеси в исходной пластине (рис. 3.12).

Глава 4. ИОННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИЙ

4.1. ВВЕДЕНИЕ

Метод ионного внедрения состоит в том, что на поверхность полупроводниковой подложки определенной ориентации подается пучок ускоренных ионов примеси с энергиями E , достаточными для их проникновения в полупроводник. Ускоренные ионы при

внедрении соударяются с электронами и атомами полупроводника и тормозятся. Согласно теоретической модели процесса ионный пучок, падающий на поверхность кристалла, распадается на два: беспорядочный и каналированный.

Беспорядочный пучок содержит частицы, которые ударяются о поверхность кристалла вблизи регулярных атомов кристаллической решетки на расстоянии, меньшем некоторого критического. Взаимодействуя с этими атомами, они сильно рассеиваются, поэтому для ионов беспорядочного пучка кристалл является как бы аморфным телом.

Каналированный пучок содержит частицы, которые, не испытывая столкновений с поверхностными атомами, могут дальше продвигаться по междуузельному пространству кристаллической решетки вдоль атомных плоскостей, как бы по каналам. Каналированный пучок возникает, если поверхность полупроводникового кристалла ориентирована по одной из главных кристаллографических плоскостей и ионы приближаются к оси канала под углом, меньшим некоторого критического.

Потери энергии ионами беспорядочного пучка обусловлены их взаимодействием с электронами и атомами кристаллической решетки. Считается, что преобладающим механизмом потерь энергии каналированными ионами являются взаимодействие с электронами (электронное торможение). Если каналированный и неканалированный пучки тормозятся независимо друг от друга, то распределение внедренных ионов получается суперпозицией распределений для обоих пучков.

Расстояние, которое проходит ион до торможения, называется длиной пробега, а средний пробег в направлении первоначальной траектории называется *средней проекцией пробега* R_p . Поскольку ионы подвергаются различному числу столкновений, они имеют и различные длины пробегов и средние проекции пробегов. Рас-

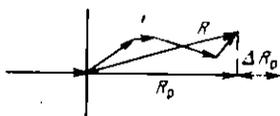


Рис. 4.1. К понятию проекции пробега

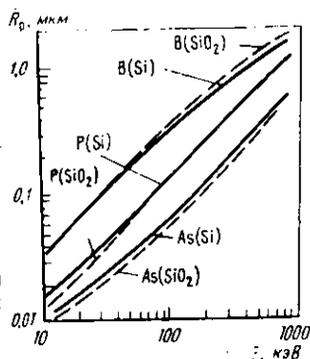


Рис. 4.2. Зависимости проекций пробега для Si и SiO₂ от энергии ионов

сеяние средней проекции пробегов описывается *средним квадратическим отклонением* $\Delta \bar{R}_p$. Распределение средних проекций пробегов по глубине определяет концентрационные профили внедренных ионов. Существует также рассеяние ионов относительно направления их первоначального движения. Его называют *боковым рассеянием* $\Delta \bar{R}_\perp$ (рис. 4.1). Оно играет важную роль при локальном ионном внедрении, поскольку определяет степень пропикновения ионов под маскирующее покрытие: боковым рассеянием определяется длина канала МОП-транзисторов с самосовмещенным затвором (см. гл. 8).

На основе теории торможения ионов рассчитаны \bar{R}_p и $\Delta \bar{R}_p$. Для основных примесей, используемых в микросхемах, данные по R_p и ΔR_p представлены в табл. 4.1 и на рис. 4.2.

Таблица 4.1. Параметры внедрения ионов различных веществ в кремний

| E, кэВ | В | | Р | | As | | Sb | |
|--------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| | \bar{R}_p , нм | $\Delta \bar{R}_p$, нм | \bar{R}_p , нм | $\Delta \bar{R}_p$, нм | \bar{R}_p , нм | $\Delta \bar{R}_p$, нм | \bar{R}_p , нм | $\Delta \bar{R}_p$, нм |
| 10 | 38 | 19 | 15 | 8 | 11 | 4 | 10 | 3 |
| 30 | 106 | 39 | 42 | 19 | 23 | 9 | 20 | 6 |
| 100 | 307 | 69 | 135 | 53 | 67 | 26 | 50 | 15 |
| 300 | 662 | 105 | 406 | 115 | 194 | 66 | 130 | 39 |

4.2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИМЕСИ ПРИ ИОННОМ ВНЕДРЕНИИ

При отсутствии эффекта каналирования рассеяние ионов носит случайный характер, и распределение их пробегов описывается функцией Гаусса. Для построения кривой распределения примесей необходимо знать два параметра: среднюю проекцию пробега \bar{R}_p и ее среднее квадратическое отклонение $\Delta \bar{R}_p$. Распределение концентрации примеси в полупроводнике дается выражением

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi} \Delta \bar{R}_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta \bar{R}_p} \right)^2 \right],$$

где D — доза облучения, равная количеству ионов, бомбардирующих единицу поверхности подложки за время внедрения. Если общий заряд этих ионов Q , то $D = Q/ql$, где q — заряд электрона; l — целое число, соответствующее заряду иона. Доза ионов связана с током пучка I , площадью его сечения A и временем внедрения t зависимостью $D = It/qlA$.

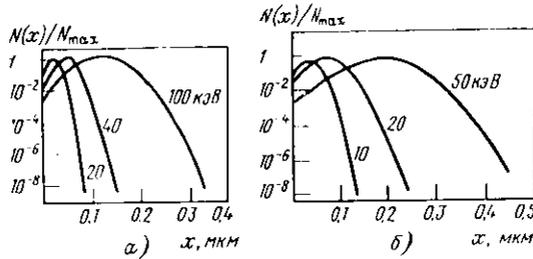


Рис. 4.3. Распределение фосфора (а) и бора (б) при ионном введении

На рис. 4.3,а,б представлена теоретическая зависимость относительной концентрации $N(x)/N_{\max}$ примеси от глубины ее проникновения в полупроводник. Максимальная концентрация введенной примеси $N_{\max} = D / (V \cdot 2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p)$ и не соответствует поверхностной концентрации (что характерно для диффузионных процессов), а наблюдается внутри полупроводника. С увеличением энергии ионов максимум концентрации ионов перемещается вглубь полупроводника, а поверхностная концентрация падает.

Присутствие катализирующих пучков изменяет характер распределения примеси: возможно появление второго максимума, обычно нежелательное в технологических процессах изготовления микросхем, либо затравивание исчезающего участка после максимума. Разориентация подложки, нанесением на поверхность аморфного слоя под углом падения пучка по отношению к главным кристаллографическим направлениям, можно исключить или ослабить эффект каталирования.

Пример. Рассчитать максимальную концентрацию примеси и глубину залегания p - n перехода при ионном введении бора с энергией $E = 100$ кэВ и дозой $D = 10^{14}$ см⁻² в кремний n -типа с исходной концентрацией $N_D = 10^{15}$ см⁻³:

$$N_{\max} = \frac{D}{V \cdot 2\pi \cdot \Delta \bar{R}_p} \approx \frac{0,4 \cdot D}{\Delta \bar{R}_p}$$

При $E = 100$ кэВ, $\bar{R}_p = 307$ нм, $\Delta \bar{R}_p = 69$ нм:

$$N_{\max} = \frac{0,4 \cdot 10^{14}}{69 \cdot 10^{-9}} = 5,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

Глубина p - n перехода определяется из соотношения

$$N_{\max} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_j - \bar{R}_p}{\Delta \bar{R}_p} \right)^2 \right] = N_{0D},$$

$$\left(\frac{x_j - \bar{R}_p}{\Delta \bar{R}_p} \right)^2 = 2 \ln \frac{N_{\max}}{N_{0D}}; \quad x_j = \bar{R}_p + \Delta \bar{R}_p \sqrt{2 \ln \left(\frac{N_{\max}}{N_{0D}} \right)},$$

$$x_j = 0,307 + 0,069 \sqrt{2 \ln (5,8 \cdot 10^{18} / 10^{15})} = 0,594 \text{ мкм.}$$

В технологии СБИС есть ряд технологических операций, в которых внедрение ионов осуществляется в подложку, покрытую одним или двумя слоями различных материалов. Например, внедрение примеси в область канала МОП-транзисторов с целью регулировки порогового напряжения, внедрение примеси в области истока и стока МДП-транзистора, если оно проводится после формирования затвора и изолирующих областей и при этом с поверхности подложки не снята не используемая в качестве маскирующего покрытия пленка нитрида кремния Si_3N_4 . Существование пленок на поверхности подложки изменяет профиль распределения примеси в легированных слоях.

4.3. РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ

При ионном легировании полупроводников концентрация свободных носителей заряда в легированном слое меньше концентрации внедренных ионов примеси, что установлено, например, при внедрении изотопов. Внедренные ионы, теряя энергию, останавливаются как в междузлиях, так и в узлах кристаллической решетки. Только в последнем случае они создают свободные носители заряда и определяют тем самым электропроводность легированного слоя. В междузельном положении ионы электрически неактивны.

В силу этого электропроводность инверсионных слоев существенно отличается от той, которую можно было бы ожидать на основании расчета концентрации введенных атомов. Чтобы судить о степени отличия вводится величина f , называемая коэффициентом использования вводимой примеси. При внедрении акцепторной примеси

$$f = (n_p + N_d) / N_A,$$

где n_p — средняя концентрация дырок в инверсионном слое; N_d — концентрация доноров в исходном кремнии; N_A — средняя концентрация введенных атомов акцепторной примеси. Аналогично можно ввести коэффициент использования при внедрении донорной примеси. Если каждый введенный атом примеси становится ионизированным акцептором или донором, то f практически равен единице.

Электрические свойства легированных слоев зависят также от структурных дефектов, которые возникают при бомбардировке поверхности полупроводника ионами с высокими энергиями и которые принято называть радиационными. Ионы при внедрении в кристалл и взаимодействии с кристаллической решеткой образуют

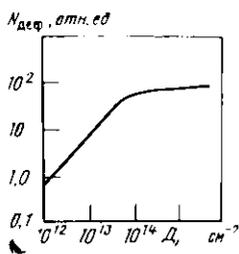


Рис. 4.4. Зависимость концентрации дефектов $N_{\text{деф}}$ от дозы облучения

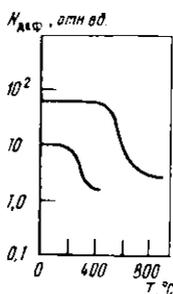


Рис. 4.5. Зависимости концентрации дефектов $N_{\text{деф}}$ от температуры отжига T

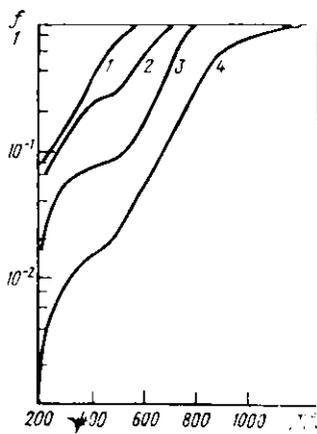


Рис. 4.6. Зависимости коэффициента использования от температуры отжига для различных доз облучения при внедрении бора:
 дозы, мкКл: 1 — 1; 2 — 10; 3 — 100; 4 — 1000

структурные дефекты типа дефектов по Френкелю. Эти дефекты создают вблизи поверхности полупроводника сильно разупорядоченные области.

Структурные дефекты влияют на электрические свойства легированных слоев полупроводника. Они снижают подвижность носителей заряда. Таким образом, электропроводность легированных слоев определяется не только концентрацией введенной примеси, но и концентрацией структурных дефектов. Кроме того, они приводят к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, увеличивая скорость рекомбинации.

Измерения показывают, что число дефектов решетки нарастает линейно с ростом дозы облучения. При больших дозах наступает насыщение, которое можно объяснить тем, что отдельные дефекты сливаются, образуя сплошной разупорядоченный слой, уже не имеющий кристаллической структуры (рис. 4.4).

Для снижения концентрации дефектов после ионного внедрения проводится отжиг полупроводниковых пластин. Кривые отжига дефектов для кремния при внедрении ионов сурьмы представлены на рис. 4.5. Очевидно, что, чем больше структурных нарушений, тем выше должна быть температура отжига и наоборот.

Проведение отжигов при $T = 400 \dots 900^\circ\text{C}$ приводит к возрастанию коэффициента использования примеси, поскольку тепловое возбуждение кристаллической решетки способствует расположению ионов в ее узлах. На рис. 4.6 представлена зависимость ко-

эффективности использования примеси от температуры отжига для различных доз облучения при внедрении бора. Для любой дозы коэффициент использования после отжига приближается к единице, но чем выше доза, тем более высокая температура для этого требуется.

При отжиге дефектов и активации примеси за счет диффузии происходит размытие концентрационного профиля. Для его установления можно найти решение одномерного уравнения диффузии для ограниченного источника примеси, представляющего собой легированный слой с гауссовым распределением примеси. Если, как и ранее, при рассмотрении диффузионных процессов предположить, что поверхность кремниевой пластины является отражающей границей, т. е. обратная диффузия примеси из подложки отсутствует, а коэффициент диффузии не зависит от концентрации внедренных ионов, то распределение внедренных ионов после отжига дефектов описывается функцией Гаусса

$$N(x, t) = \frac{D}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2Dt)}} \exp\left[-\frac{x^2 - (x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)}\right].$$

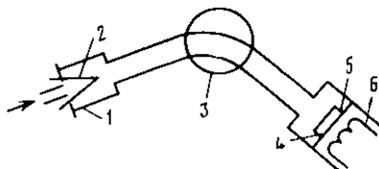
Изменение концентрационного профиля при отжигах пластин после ионного внедрения может быть устранено при применении для отжига лазерного излучения с энергией 1...100 Дж/см². Отжиг проводится в течение короткого времени, составляющего единицы секунд, поэтому заметной диффузии внедренной примеси не происходит. При этом быстрый лазерный отжиг обеспечивает такую же электрическую активность внедренной примеси, как и обычная термическая обработка. Принцип быстрого отжига дефектов состоит в том, что в результате воздействия лазерного луча происходят процессы твердофазной или жидкофазной эпитаксии.

4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА ИОННОГО ВНЕДРЕНИЯ

Установки для ионного внедрения. Схема установки представлена на рис. 4.7. Установка состоит из нескольких основных блоков: ионного источника, магнитного масс-анализатора и камеры с кремниевой пластиной-мишенью.

Рис. 4.7. Схема установки для ионного внедрения:

1 — камера источника примеси; 2 — термокатод; 3 — магнитный масс-анализатор; 4 — камера мишени; 5 — пластина-мишень; 6 — спираль нагрева мишени



Ионный источник представляет собой вакуумную камеру, в которой поддерживается давление $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. В камере осуществляется ионизация паров легирующей примеси. В качестве ионизируемых используются вещества, содержащие требуемую примесь. Например, для получения ионов фосфора можно использовать газ PF_5 , для получения ионов бора — газ BF_3 . Ионизация паров легирующей примеси осуществляется бомбардировкой электронами, эммитируемыми термокатодом. Положительные ионы экстрагируются из области их образования с помощью отрицательно заряженного пустотелого зонда, фокусируются в пучок электростатическими линзами и ускоряются напряжением 20 ... 300 кВ, подаваемым на ускоряющий электрод. Пучок ионов формируется диаметром до 1 см.

Пучок ускоренных ионов попадает в магнитное поле масс-анализатора, которое заставляет ионы перемещаться по дуге окружности с радиусом, определяемым магнитным полем H , ускоряющим напряжением U и массой иона M ,

$$r \approx \frac{1}{H} \left(\frac{2MU}{q} \right)^{1/2}.$$

Напряженность магнитного поля составляет $(4,0 \dots 4,8) \cdot 10^3$ А/м.

Таким образом, ионы с различными массами будут двигаться по различным траекториям. Если в первоначальном пучке кроме ионов основной легирующей примеси присутствовали ионы посторонних примесей, то вследствие сепарирования по массам, происходящего в масс-анализаторе, ионы основной примеси будут собраны в отдельный пучок, в котором присутствие других примесей исключено. Выделенный по массе пучок ионов проходит через апертурную диафрагму и направляется в приемную камеру, где располагаются подложки. Сепарирование ионов по массам обеспечивает одну из основных положительных особенностей легирования полупроводников ионным внедрением, а именно исключительно высокую чистоту внедряемой примеси. В камере с мишенью обычно предусматривается возможность нагрева мишени. Установка содержит устройство для сканирования ионного пучка по подложке. Подложка имеет хороший электрический контакт с держателем подложки. В электрической цепи держателя подложки может стоять интегратор заряда. Электроны проходят через интегратор заряда и нейтрализуют ионы, внедренные в подложку. По интегрированному заряду можно определить дозу внедренных ионов. Типичные диапазоны токов пучка и дозы составляют ($10 \dots 10^3$) мкА и $10^{11} \dots 10^{16}$ ион./см² соответственно.

Пример. Определить время воздействия пучка с плотностью тока $0,1$ мА/см² для получения легированного слоя толщиной $d =$

$= 100$ нм со средней концентрацией $N = 10^{20}$ см $^{-3}$. Кратность ионизации иона равна 1.

$$D = J_{\text{пл}} \cdot t \cdot q; \quad t = Dq / J_{\text{пл}}; \quad D = Nd;$$

$$t = \frac{Ndq}{J_{\text{пл}}} = \frac{10^{20} \cdot 100 \cdot 10^{-7} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{10^{-4}} = 1,6 \text{ с.}$$

Для слоев, легированных ионным внедрением примесей, профили распределения внедренных атомов изучают, используя ряд физических методов. Широкое распространение получил метод масс-спектрографии вторичных ионов. Метод основан на распылении легированных слоев бомбардировкой в вакууме ионами аргона. При распылении образуются вторичные ионы. Из пучка вторичных ионов в масс-анализаторе выделяются ионы неследуемой примеси. Ионный ток пропорционален концентрации примеси в распыленном слое, а время распыления пропорционально его толщине. В силу этого зависимость ионного тока от времени эквивалентна зависимости концентрации примеси от глубины.

Локальное ионное внедрение. При изготовлении микросхем с использованием ионного легирования, как и при диффузии, примесь должна внедряться локально. Для проведения локального ионного внедрения используются маскирующие пленки. К материалам для маскирующих пленок относятся диэлектрики SiO $_2$, Si $_3$ N $_4$, Al $_2$ O $_3$, металлы Al, Ni, Au, поликремний, фоторезист. Наиболее широко в качестве маскирующей пленки в технологии bipolarных микросхем используются пленки SiO $_2$ и фоторезист, а в технологии МДП-микросхем пленки SiO $_2$, поликремний и фоторезист. Поскольку пробег иона зависит от его энергии, то, следовательно, от энергии ионов зависит и необходимая толщина маскирующей пленки.

Таблица 4.2. Значения средних проекций пробега \bar{R}_p и среднеквадратичного отклонения $\Delta\bar{R}_p$ в SiO $_2$

| Энергия, кэВ | Параметры, нм | | | |
|--------------|---------------|-------------------|-------------|-------------------|
| | B | | As | |
| | \bar{R}_p | $\Delta\bar{R}_p$ | \bar{R}_p | $\Delta\bar{R}_p$ |
| 20 | 69 | 24 | — | — |
| 40 | 142 | 40 | 35 | 12,5 |
| 80 | — | — | 52 | 18 |
| 100 | 330 | 67 | — | — |

В табл. 4.2 представлены средние проекции пробега и среднеквадратичные отклонения при внедрении бора и мышьяка в пленку

ки SiO_2 . Сравнительные данные по \bar{R}_p в кремнии и двуокиси кремния представлены на рис. 4.2, из которого видно, что тормозные способности Si и SiO_2 близки. На основе этих данных может быть рассчитана толщина маскирующего покрытия SiO_2 .

Пример. Определить толщину d_{SiO_2} пленки SiO_2 , маскирующей кремниевую подложку при локальном внедрении ионов бора в кремнии n -типа с исходной концентрацией $N_{0D} = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ с целью создания p - n перехода с глубиной залегания $x_j = 0,4 \text{ мкм}$ и максимальной концентрацией $N_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Глубина залегания p - n перехода равна

$$x_j = \bar{R}_p + \Delta \bar{R}_p \sqrt{2 \ln(N_{\text{max}}/N_{0D})};$$

$$0,4 = \bar{R}_p + \Delta \bar{R}_p \sqrt{2 \ln(5 \cdot 10^{18}/10^{16})} = \bar{R}_p + 3,5 \Delta \bar{R}_p = X.$$

Построив зависимость, исходя из табл. 4.1, $X = f(E)$, можно найти E , при которой $X = 0,4 \text{ мкм}$. Эта энергия составляет 70 кэВ . При этом $\bar{R}_p = 215 \text{ нм}$, а $\Delta \bar{R}_p = 60 \text{ нм}$. Если полагать, что пленка SiO_2 маскирует от внедрения ионов, когда на глубине $x = d_{\text{SiO}_2}$ концентрация внедренных ионов не превышает $0,1\%$ от максимальной, то d_{SiO_2} может быть определена из соотношения

$$\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{\text{SiO}_2} - \bar{R}_{p1}}{\Delta \bar{R}_{p1}} \right)^2 \right] = 10^{-3};$$

$$\frac{d_{\text{SiO}_2} - \bar{R}_{p1}}{\Delta \bar{R}_{p1}} = \sqrt{2 \ln 1000} = 3,71;$$

$$d_{\text{SiO}_2} = \bar{R}_{p1} + 3,71 \Delta \bar{R}_{p1}.$$

В предположении, что тормозные способности Si и SiO_2 совпадают (рис. 4.2)

$$d_{\text{SiO}_2} = 215 + 3,71 \cdot 60 = 437,6 \text{ нм}.$$

При выборе материала маски необходимо учитывать, что после ионного внедрения производится отжиг радиационных дефектов и активация внедренной примеси. Это относится, в основном, к выбору материала затвора в МОП-транзисторах с самосовмещенным затвором, когда области стока и истока создаются ионным внедрением уже после формирования затвора. Типовые процессы изготовления таких транзисторов и микросхем на их основе рассмотрены в гл. 8.

Использование в качестве маскирующей пленки алюминия заставляет снижать температуру отжига радиационных дефектов ниже температуры плавления Al — 660°C . Применение маскирующих пленок SiO_2 полукремния позволяет проводить высокотемпературные отжиги ($800 \dots 900^\circ\text{C}$) без существенного изменения полученного профиля распределения примеси.

Ионное внедрение примесей, наряду с диффузией, широко используется в технологии изготовления интегральных микросхем. По сравнению с диффузией оно имеет ряд положительных особенностей. Одна из них — возможность внедрения примеси при сравнительно низких температурах кремниевых подложек. При этом профиль распределения внедренной примеси и ее концентрация могут регулироваться независимо: профиль — энергией ионов, а концентрация — дозой облучения. Кроме того, при ионном внедрении концентрация примеси не ограничивается, как в процессе диффузии предельной растворимостью, соответствующей температуре процесса.

В биполярных микросхемах применение ионного внедрения упрощает процесс получения эмиттеров малых площадей, поскольку здесь при локальном внедрении значительно снижено боковое продвижение примеси под защитную маску. Для ионного внедрения примеси характерны высокая однородность легирования по поверхности подложки и точный контроль общего количества внедренной примеси. Поэтому замена первого этапа диффузии (загонки) при создании базовой области транзистора на ионное внедрение примеси обеспечивает лучшее воспроизведение структурных и электрических параметров транзисторов биполярных микросхем. В МОП-микросхемах использование ионного внедрения направлено, в основном, на получение МОП-транзисторов с самосовмещенным затвором.

Глава 5. ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

5.1. ВВЕДЕНИЕ

Эпитаксиальным наращиванием или эпитаксией называют процесс ориентированного наращивания слоя вещества на исходный монокристалл — подложку. Автоэпитаксией (гомоэпитаксией) называют ориентированное наращивание слоя, отличающегося от подложки только примесным составом. Ориентированное наращивание вещества на инородные подложки называют гетероэпитаксией.

Для проведения процессов эпитаксиального наращивания необходимо создать условия для конденсации атомов осаждаемого вещества на поверхности подложки. Конденсация может происходить из пересыщенного пара (из парогазовой смеси) или жидкого раствора, а также при испарении осаждаемого вещества в вакууме.

Современные представления о механизме конденсации из паровой фазы и ориентированном росте сводятся к следующему. Поверхность подложки имеет определенный потенциальный рельеф, соответствующий расположению узлов ее кристаллической решетки. Для реальной поверхности строгое чередование по-

тенциальных барьеров и ям нарушается под влиянием поверхностных структурных дефектов: вакансий; адсорбированных атомов; ступеней, обусловленных выходом на поверхность винтовых дислокаций. Обычно эти дефекты приводят к возникновению более глубоких потенциальных ям. Атомы осаждаемого вещества при столкновении с подложкой могут попадать в потенциальные ямы. В результате флуктуаций тепловой энергии (особенно при повышенных температурах подложки) атомы могут переходить в соседние потенциальные ямы и таким образом перемещаться по поверхности подложки — мигрировать, а при достаточно высокой энергии могут испаряться. Попадая в более глубокую потенциальную яму, например встретив ступеньку при миграции по поверхности, атом устанавливает прочную связь с соседними атомами кристалла. К этому атому присоединяются другие атомы, и в конечном счете происходит дстраивание кристаллической плоскости. Таким образом, благодаря наличию поверхностных дефектов и обусловленных ими глубоких потенциальных ям, атомы при конденсации находят наиболее устойчивые состояния на поверхности подложки. Отсюда следует то большое значение, которое имеют свойства подложки в механизме роста эпитаксиальных слоев.

При невысоких температурах длины поверхностной диффузии атомов невелики, поэтому вероятность встраивания атомов в местах первоначального их попадания на подложку увеличивается. К встроеным атомам могут присоединиться новые сконденсированные атомы, в результате чего происходит рост в вертикальном направлении и образование трехмерных зародышей (рис. 5.1,а). Очевидно, что начавшийся вертикальный рост в то время, когда на поверхности подложки еще не образовалась сплошная пленка, может привести к разбросу эпитаксиального слоя по толщине и плохому воспроизведению микрорельефа на поверхности подложки. Предпочтителен рост в горизонтальном направлении. В этом случае благодаря высокой температуре процесса и эффективной миграции атомы находят устойчивые состояния, только присоединившись к ступеням выхода на поверхности винтовых дислокаций. Таким образом, рост эпитаксиального слоя в горизонтальном направлении (рис. 5.1,б) можно представить как перемещение ступеней. При высоких температурах скорость образования трехмерных зародышей очень мала, соответственно мала и скорость вертикального роста.

В настоящее время используются, в основном, три метода эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев: 1) метод осаждения из газовой фазы; 2) метод осаждения из паровой фазы; 3) метод осаждения из растворов (жидкостная эпитаксия).

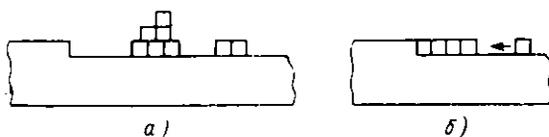
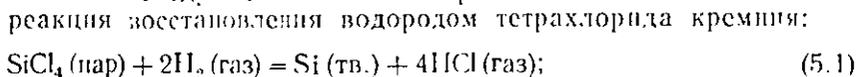


Рис. 5.1. Рост эпитаксиальной пленки в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях

5.2. ХЛОРИДНЫЙ И СИЛАНОВЫЙ МЕТОДЫ АВТОЭПИТАКСИИ КРЕМНИЯ

Метод осаждения кремния из газовой фазы основан на использовании следующих химических реакций:



пиролитическое разложение силана.



Хлоридный метод. Этот метод автоэпитаксии кремния в промышленном производстве получил большое распространение. Он основан на реакции (5.1) и осуществляется на установке (рис. 5.2), которая состоит из реакционной камеры и газовой системы, обеспечивающей подачу в камеру водорода, азота, их смеси и хлористого водорода HCl. Подача азота предусмотрена необходимостью удаления воздуха из газовой системы и реакционной камеры и обеспечения безопасного функционирования установки. Смесь водорода и хлористого водорода вводится в реакционную камеру для газовой очистки поверхностей подложек непосредственно перед эпитаксальным наращиванием. В газовую систему включены сосуды, содержащие жидкие тетрахлорид кремния и газогенераторы тех примесей, которые должны быть введены в эпитаксальную пленку при ее наращивании.

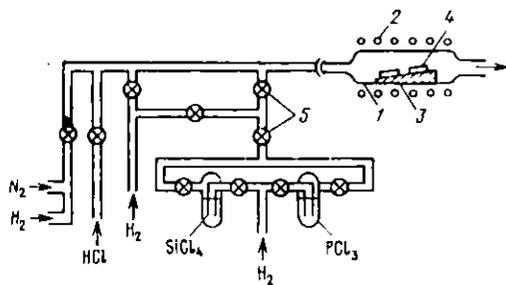


Рис. 5.2. Установка для эпитаксального наращивания хлоридным методом:

1 — реакционная камера; 2 — индуктор; 3 — подставка для подложек; 4 — подложки; 5 — вентиль

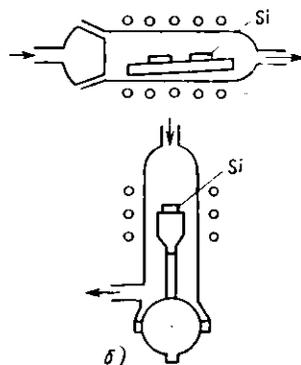


Рис. 5.3. Типы реакционных камер для эпитаксального наращивания:

(а) горизонтальная, (б) вертикальная

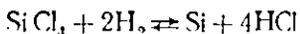
На рис. 5.3 представлены типы реакционных камер. В горизонтальной камере (а) подложки расположены горизонтально, газовый поток направляется параллельно их поверхности, в вертикальной камере (б) подложки расположены горизонтально, газовый поток направляется перпендикулярно их поверхности. Реакционная камера и газовая система выполняются из особо чистого переплавленного кварца. Для предотвращения реакции на стенках камеры их охлаждают, создавая обычно водяную рубашку. Нагрев реакционной камеры происходит от индукционного нагревателя. Подставки под подложки выполняются из графита и служат одновременно для поглощения и передачи тепла. Поскольку графит — пористый материал и очистка его сложна, то при высоких температурах из него возможно большое газотделение. Чтобы исключить загрязнение атмосферы камеры графитом и выделяющимися из него газами, подставки покрывают кремнием или карбидом кремния.

Рассмотрим факторы, влияющие на скорость эпитаксиального наращивания и качество эпитаксиальных слоев. Химические реакции, происходящие при эпитаксиальном наращивании, относятся к гетерогенным реакциям (см. § 2.5). Первый и пятый этапы — перенос реагентов к поверхности и перенос продуктов реакции — определяются скоростью газового потока. Второй (адсорбция), третий (собственно химическая реакция) и четвертый (десорбция) этапы сильно зависят от температуры. Процесс присоединения образующихся атомов кремния к подложке также определяется температурой. В целом скорость эпитаксиального наращивания контролируется наиболее медленным из этих этапов. На рис. 5.4 представлена зависимость скорости наращивания от температуры подложек и скорости газового потока. При низких температурах (до 1150 °С) скорость наращивания повышается с ростом температуры. Здесь она слабо зависит от скорости газового потока, из чего можно заключить, что процесс наращивания определяется скоростью химической реакции. При температурах 1200 ... 1300 °С скорость наращивания практически не зависит от температуры. Существенное влияние скорости потока газа свидетельствует об определяющем значении переноса реагирующих веществ.

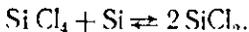
Низкотемпературный диапазон (950 ... 1000 °С) характеризуется определяющим влиянием температуры на скорость наращивания и низким качеством эпитаксиального слоя. Адсорбированные на поверхности подложки атомы кремния задерживаются в глубоких потенциальных ямах, при этом процессе миграции атомов по поверхности практически отсутствует, в силу чего скорость наращивания определяется локальными свойствами поверхности в тех точках, где располагаются адсорбированные атомы. Нарасчи-

ванне кремния в таких условиях приводит при температурах ниже 1000°C к росту нитевидных кристаллов, а при $T=1000 \dots 1150^\circ\text{C}$ к росту беспорядочно ориентированных поликристаллов или монокристаллических слоев с большой концентрацией структурных дефектов. При температурах выше 1150°C выращиваются монокристаллические эпитаксиальные слои уже с достаточно высокой степенью структурного совершенства. Наиболее качественные эпитаксиальные слои кремния образуются при температурах около 1250...1270°C. При этом типичные значения скорости роста составляют десятые доли и единицы микрометров в минуту.

При высокотемпературном наращивании (более 1250°C) концентрация SiCl_4 в области подложек, определяющая скорость роста, зависит как от скорости газового потока, так и от давления паров SiCl_4 . Зависимость скорости наращивания от молярной концентрации SiCl_4 в газовом потоке представлена на рис. 5.5. Скорость роста увеличивается при повышении молярной концентрации SiCl_4 только при небольших ее значениях, а затем при $M_m > 0,1$ спадает. Повышение содержания SiCl_4 до значений $M_m \sim 0,27$ при температуре процесса 1270°C приводит не к наращиванию слоя кремния, а к травлению поверхности подложки. Такой характер рассматриваемой зависимости обусловлен обратимостью реакции восстановления тетрахлорида



и возможностью протекания реакции диспропорционирования



Вследствие этих реакций при высоком содержании SiCl_4 , а следовательно и HCl , могут происходить одновременно два процесса — и наращивание слоя кремния и его подтравливание.

Легирование эпитаксиальных слоев при наращивании хлоридным методом. В технологическом процессе создания микросхем используются подложки кремния с эпитаксиальными слоями различных удельного сопротивления и типа проводимости. Для получения эпитаксиальных слоев с заданными свойствами их легируют в процессе роста элементами III и V групп.

Для хлоридного метода разработано несколько способов легирования, из которых здесь будут рассмотрены два. Первый способ состоит в том, что в газовую фазу наряду с тетрахлоридом кремния вводят галогениды легирующей примеси. Используемые для легирования галогениды элементов III и V групп — трехбромистый бор BBr_3 , треххлористый фосфор PCl_3 , треххлористый мышьяк AsCl_3 и треххлористая сурьма SbCl_3 — представляют собой жидкие, легко испаряющиеся вещества. При этом концентрация легирующей примеси варьируется изменением температуры

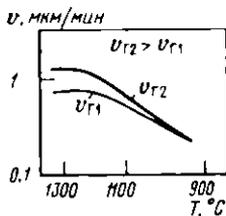


Рис. 5.4. Зависимость скорости v наращивания эпитаксиального слоя от температуры T для различных скоростей газового потока $v_{г1}$, $v_{г2}$

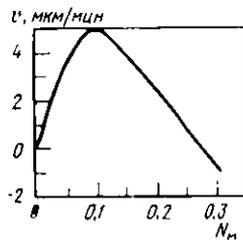


Рис. 5.5. Зависимость скорости v наращивания эпитаксиального слоя от молярной концентрации N_m тетрахлорида крения в газовом потоке

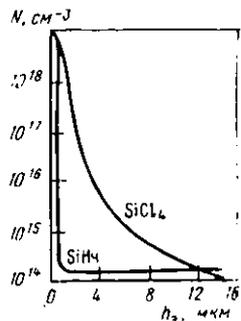
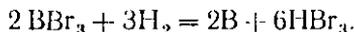
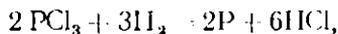


Рис. 5.6. Распределение примеси в эпитаксиальном слое толщиной h_2 , выращенном на подложке n^+ -типа

испарителя (сосуда, содержащего галогенид примеси) и скорости водородного потока. Атомы легирующей примеси образуются в результате реакций восстановления галогенидов примеси водородом, например:



Второй способ легирования основан на использовании газообразных источников легирующих элементов, например гидридов — бора B_2H_6 , фосфора PH_3 , сурьмы SbH_3 , мышьяка AsH_3 . В этом способе концентрация легирующего элемента варьируется изменением концентрации соответствующего гидрида в смеси гидрида с водородом.

Концентрационный профиль примеси на границе раздела подложка — эпитаксиальный слой. При образовании эпитаксиальных слоев происходит интенсивное внедрение примеси, содержащейся в подложке, в эпитаксиальный слой. Это особенно заметно при наращивании высокоомных слоев на сильнолегированные подложки. Примером могут служить биполярные микросхемы, в которых эпитаксиальный слой n -типа наращивается на сильнолегированный «скрытый» n^+ -слой (см. рис. 1.2). Благодаря такому внедрению сглаживается резкое различие концентрации примеси в подложке и эпитаксиальном слое. Внедрение примеси из подложки в эпитаксиальный слой обусловлено двумя факторами — диффузией и автолегированием.

Диффузия примесей из сильнолегированной подложки при наращивании высокоомных слоев очевидна, поскольку имеется гра-

диент примеси, а процесс паразитивания проводится при высоких температурах.

При автолегировании внедренные примеси из подложки в растущий эпитаксиальный слой обусловлено травлением подложки (при реакции диспропорционирования или при реакции с хлористым водородом). В результате такого травления образуются не только хлориды кремния, но и хлориды содержащихся в кремнии примесей. Они переходят в газовую среду, а в силу обратимости проходящих реакций внедряются в растущий слой.

На рис. 5.6 представлено распределение примеси в эпитаксиальном слое, выращенном на подложке n^+ -типа. Очевидно, что в силу того, что концентрация примеси плавно спадает в эпитаксиальном слое, слой с заданной концентрацией, более низкой, чем в подложке, может быть получен только в том случае, если он будет выращен достаточно большой толщины. Это обстоятельство имеет особое значение, поскольку большая толщина эпитаксиального слоя ограничивает повышение степени интеграции bipolarных микросхем.

Указанное положение подтверждается рядом требований к технологическому процессу при переходе к большим и сверхбольшим микросхемам.

Увеличение степени интеграции микросхемы вызывает необходимость увеличения плотности упаковки элементов. Из-за дефектности защитных и маскирующих пленок SiO_2 (наличие сквозных отверстий — проколов) размер площади кристалла, на котором помещается микросхема, не может увеличиваться пропорционально росту в ней числа элементов. Такой рост площади кристалла неизбежно привел бы к увеличению вероятности прокола в SiO_2 и, следовательно, к дефекту микросхемы в некоторой локальной области. В результате возможно недопустимо резкое снижение процента выхода годных микросхем. Размеры самих элементов микросхем современными методами литографии могут быть снижены до микроновых и субмикровых размеров. Это не только приводит к уменьшению площади микросхем, но и к повышению ее быстродействия.

Однако при большой толщине эпитаксиального слоя до каких бы малых размеров не были уменьшены элементы микросхем существенно снизить общий размер кристалла невозможно из-за того, что в этом случае нельзя уменьшить размеры изолирующих p^+ -областей. Образование изолирующих p -областей в bipolarных микросхемах показано на рис. 5.7 в разрезе (а) и топологии (б). Изолирующие области должны полностью разделить эпитаксиальный слой, следовательно, глубина диффузии должна быть не менее толщины эпитаксиального слоя h_s . Поскольку боковая диффузия происходит на расстоянии, составляющие $d_s \approx 0,7h_s$, общий

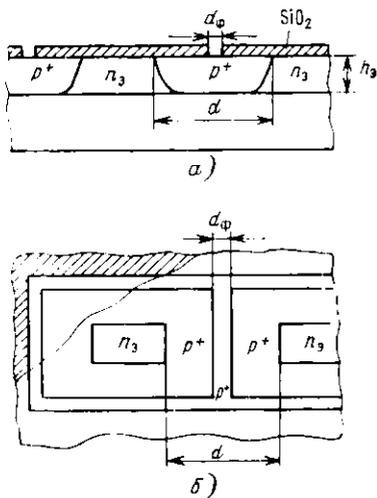


Рис. 5.7. Образование изолирующих p^+ -областей в биполярной микросхеме

получение эпитаксиальных слоев с высоким совершенством кристаллической структуры, с одной стороны, и резким концентрационным профилем на границе с подложкой — с другой, выдвигает противоречивые требования к температурному режиму процесса. Это противоречие снимается с применением двухстадийного процесса. Первая стадия — очень кратковременный нагрев подложки (15...20 с) до температуры около 1300°C . Вторая стадия осуществляется при температуре около 1150°C в течение времени, требуемого для получения заданной толщины слоя. При этом несмотря на низкую температуру процесса качество растущего эпитаксиального слоя остается высоким.

Совершенство структуры эпитаксиальных слоев, полученных в двухстадийном процессе, может быть объяснено осаждением кремния на свежеработанную не загрязненную поверхность.

Одной из основных причин низкого качества слоев в низкотемпературном процессе эпитаксии является окисление подложки, несмотря на тщательную очистку водорода. После высокотемпературной обработки вероятность окисления подложки уменьшается.

Особенности эпитаксиального наращивания, в том числе при двухстадийном процессе, могут быть объяснены другим механизмом роста. В определенных условиях конденсация и наращивание из паровой фазы осуществляется не в прямом переходе пар — твердая фаза, а в более сложном переходе пар — жидкая фаза — твердая фаза. Образование жидкой фазы происходит в тройной сис-

топологический размер изолирующей области будет равен $d = d_\phi + 2 \cdot 0,7h_3$, где d_ϕ — размер фотолитографически открытого окна в SiO_2 при проведении разделительной диффузии. Например, если $d_\phi = 2$ мкм, а $h_3 = 10$ мкм, то $d = 16$ мкм.

Для снижения концентрации примесей, проникающих в эпитаксиальный слой вследствие диффузии, следует использовать подложки с примесями, имеющими низкие коэффициенты диффузии, например с мышьяком и сурьмой вместо фосфора.

Перераспределение примесей на границе подложка — эпитаксиальный слой выражено тем сильнее, чем выше температура процесса наращивания. Поэтому

теме кремний — кислород — примесь при достижении эвтектической температуры, которая может быть в таких системах достаточно низкой. Присутствие кислорода в тройной системе связано с его растворением в кремниевой подложке (до $10^{21} \dots 10^{23}$ ат./ m^3), тетрахлориде кремния $SiCl_4$ и очищенном водороде (до $10^{17} \dots 10^{18}$ ат./л).

Гетерогенная реакция для процесса эпитаксии по схеме пар — жидкая фаза — твердая фаза дополняется двумя стадиями: 1) растворение в жидкой фазе кремния и легирующей примеси, образованных в результате реакции восстановления; 2) пересыщение жидкой фазы кремнием и его выделение на границе раздела жидкой и твердой фаз. Растущий благодаря этому выделению эпитаксиальный слой содержит примесь и кислород в соответствии с их коэффициентами распределения между твердой и жидкой фазами и имеет совершенную структуру при более низких температурах, в диапазоне 1150 ... 1200 °C. Понижение же температуры процесса ослабляет перераспределение примеси на границе подложка — эпитаксиальный слой.

Пример. Найти минимальную скорость роста эпитаксиального слоя в режиме $T=1100^\circ C$, $t=20$ мин, на поверхности которого концентрация сурьмы, внедряемой из подложки, равна нулю.

Скрытый n^+ -слой, легированный сурьмой, является неограниченным источником примеси для растущего эпитаксиального слоя, а распределение примеси соответствует дополнительной функции ошибок. Минимальная скорость, при которой на поверхности слоя концентрация внедряемой примеси снизится до нуля, определяется из условия $N(x, t) = N_s(1 - \text{erf}(h_s/2\sqrt{\mathcal{D}t}))$. Отсюда $\text{erf}(h_s/2\sqrt{\mathcal{D}t}) = 1$, $h_s/2\sqrt{\mathcal{D}t} = 3,76$, $h_s = v_s t = 3,76 \cdot 2\sqrt{\mathcal{D}t}$, $v_s = 3,76 \times 2\sqrt{\mathcal{D}t}/t$. Для сурьмы при $T=1100^\circ C$ $\mathcal{D} = 2 \cdot 10^{-14}$ cm^2/s ;

$$v_s = \frac{3,76 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-14} \cdot 60 \cdot 10^4}{20 \cdot 60} = 1,84 \cdot 10^{-2} \text{ мкм/мин.}$$

Эпитаксия на подложках со скрытыми слоями. Скрытыми слоями в структурах интегральных микросхем называются слои, полученные локальным легированием подложки до процесса эпитаксии. Наиболее широко такие слои создаются в биполярных микросхемах для снижения сопротивления коллекторной области транзистора. Полученные диффузией или ионным легированием, они обычно содержат сурьму в качестве легирующей примеси с концентрацией около 10^{19} cm^{-3} . Таким образом, проведение процесса эпитаксии на подложках со скрытыми слоями соответствует случаю наращивания эпитаксиального слоя на высоколегированную подложку и, следовательно, здесь должны учитываться факторы, приводящие к «размытию» концентрационного профиля на границе раздела подложка — эпитаксиальный слой. Отсюда выбор в качестве примеси сурьмы, имеющей низкий коэффициент диффузии.

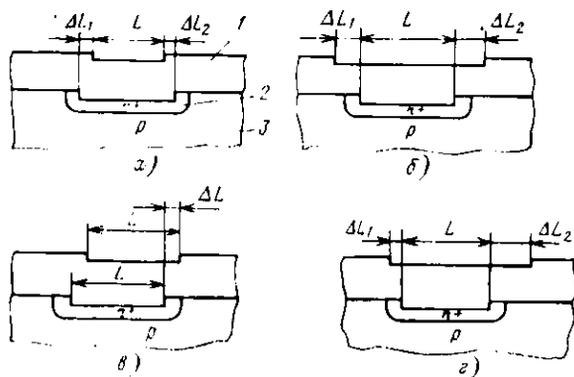


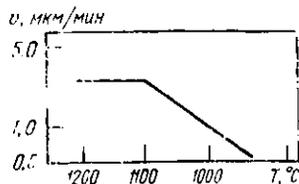
Рис. 5.8. Искажения топологического рисунка скрытого слоя: симметричное с уменьшением (а) и увеличением (б) размера; асимметричное без изменения (в) и с изменением (г) размера

Эпитаксия на подложках со скрытыми слоями сопровождается еще одним эффектом, оказывающим существенное влияние как на процесс эпитаксии, так и на последующие технологические процессы. Эффект состоит в искажении топологического рисунка скрытых слоев. Топологический рисунок скрытого слоя должен совмещаться с рисунками других слоев транзисторной структуры, например с топологическими рисунками разделительных областей, областей базы, эмиттера и т. д. Совмещение можно производить благодаря наличию ступенек высотой 100...150 нм. Ступенька образуется при локальном легировании скрытого слоя за счет химической реакции на поверхности кремния, свободной от маскирующей пленки SiO_2 (см. § 3.4), и воспроизводится при наращивании эпитаксиального слоя.

На рис. 5.8,а и б представлены возможные случаи симметричного смещения рисунка, т. е. с одинаковым изменением размеров ($\Delta L_1 = \Delta L_2$), на рис. 5.8,в — случай смещения топологического рисунка без изменения его размера, на рис. 5.8,г — случай асимметричного смещения рисунка с изменением размеров ($\Delta L_1 \neq \Delta L_2$).

Природа эффекта искажения топологического рисунка достаточно сложна и зависит от технологических параметров процесса осаждения — температуры, скорости роста, процентного содержания SiCl_4 и других. Можно назвать, по крайней мере, два фактора, которые определенно влияют на смещение и искажение топологического рисунка скрытого слоя. Один из них состоит в том, что огранка поверхностных макроступеней, образующихся при локальной диффузии, создается различными кристаллографическими плоскостями. И поэтому из-за анизотропии скорости эпитакси-

Рис. 5.9. Зависимость скорости v наращивания эпитаксиального слоя от температуры T для силанового метода



ального роста пленки происходит изменение конфигурации и смещение макроступеней. Вторым фактором — движение самих макроступеней, образующихся при создании топологического рисунка.

Силановый метод. Плавный концентрационный профиль на границе раздела подложка — эпитаксиальный слой, свойственный хлоридному методу, ограничивает получение тонких эпитаксиальных слоев. Для решения этой задачи используется силановый метод эпитаксиального наращивания, в основе которого лежит реакция пиролизического разложения моносилана (5.2).

Моносилан кремния представляет собой бесцветный газ, способный самовоспламениться при соприкосновении с воздухом, поэтому работа с ним требует особых мер безопасности. Обычно моносилан сильно разбавляют водородом. Если объемная концентрация моносилана в водороде меньше 1%, то он утрачивает самовоспламеняемость.

При силановом методе пользуются установками, конструктивно аналогичными применяемым для хлоридного метода эпитаксии. Реакция пиролизического разложения начинается при температуре около 600°C. Зависимость скорости роста эпитаксиального слоя от температуры представлена на рис. 5.9. Рост качественных слоев происходит уже при температуре около 1000°C. Это снижение температуры по сравнению с хлоридным методом существенно влияет на концентрационный профиль. Претставление о различии концентрационных профилей для хлоридного и силанового методов дает рис. 5.6. Резкий профиль в силановом методе объясняется не только снижением температуры, хотя это и очень важно, поскольку снижение температуры на 100°C почти на порядок уменьшает коэффициенты диффузии примесей. Важно и то, что в силановом методе не образуются никаких галогенидов, способных травить подложку и тем самым переносить имеющуюся в ней примесь через газовую фазу в растущий эпитаксиальный слой.

5.3. МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) — это метод ориентированного наращивания слоев вещества при конденсации молекулярных пучков в вакууме. В этом методе по сравнению с ранее рассмотренными методами наращивание эпитаксиальных слоев

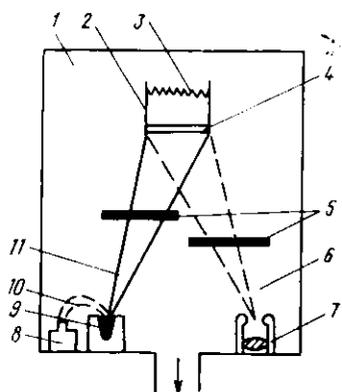


Рис. 5.10. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии с легированием на основе испарения примесей:

1 — рабочая камера; 2 — держатель подложки; 3 — нагреватель; 4 — подложка; 5 — заслонка; 6 — поток примеси; 7 — источник примеси; 8 — электронная пушка; 9 — источник кремния; 10 — поток электронов; 11 — поток кремния

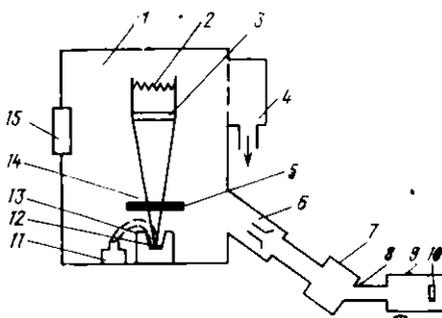


Рис. 5.11. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии с легированием на основе ионного внедрения примеси:

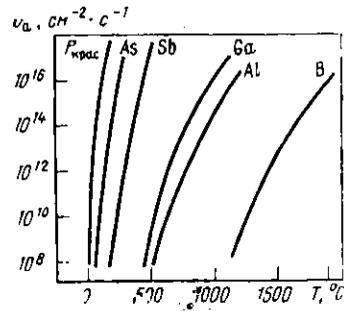
1 — рабочая камера; 2 — нагреватель; 3 — подложка; 4 — загрузкиная камера; 5 — заслонка; 6 — отклоняющие пластины; 7 — масс-анализатор; 8 — фокусирующая система; 9 — камера источника ионов; 10 — источник ионов; 11 — электронная пушка; 12 — источник кремния; 13 — электронный поток; 14 — заслонка; 15 — смотровое окно

происходит при более низких температурах (400...800 °С). В этом состоит основное преимущество МЛЭ, поскольку при низких температурах уменьшается влияние диффузии из подложки на концентрационный профиль в эпитаксиальных слоях. Кроме того, здесь используются принципиально другие методы легирования эпитаксиальных слоев, позволяющие легко варьировать профиль легирования.

Создание молекулярных пучков кремния и легирующих примесей и их последующая конденсация происходят в замкнутой рабочей камере в условиях сверхвысокого вакуума (давление остаточных газов $1,33 \cdot 10^{-6}$... $1,33 \cdot 10^{-8}$ Па). На рис. 5.10 и 5.11 представлены схемы установок для МЛЭ с различными способами легирования наращиваемых слоев. Один из них основан на легировании атомами испаряемой примеси, второй — на ионной имплантации примеси в растущий слой.

Установка для первого способа легирования (рис. 5.10) содержит источник кремния и источник легирующей примеси. Источник кремния представляет собой расплав кремния, образующийся в тигле под действием электронного луча, создаваемого электронной пушкой. Испарение легирующей примеси происходит в результате резистивного подгрева тигля, содержащего материал примеси. В установке предусмотрены заслонки, перекрывающие

Рис. 5.12. Температурная зависимость потока атомов испаряемых примесей $v_a(T)$



потоки кремния и легирующей примеси на подложку. Нагреватель обеспечивает требуемый температурный диапазон подложки в процессе эпитаксии. Для предотвращения попадания воздуха в рабочую камеру, функционирующую в условиях сверхвысокого вакуума, предусмотрено грузозачное устройство.

После испарения атомы кремния и легирующей примеси достигают поверхности и встраиваются в кристаллическую решетку. Скорость переноса атомов определяется главным образом их тепловой энергией, так как в сверхвысоком вакууме столкновения атомов маловероятны. Поэтому скоростью процесса наращивания и уровнем легирования растущего слоя можно управлять, изменяя параметры источников, в частности их температуру, а следовательно, и плотности потоков.

Выбор материалов легирующих донорных и акцепторных примесей производится на основе температурной зависимости потока атомов осаждаемых примесей (рис. 5.12). При резком изменении потока примеси с температурой управление потоками и их варьирование в заданных пределах усложняются. Как видно из рис. 5.12, наиболее резкое изменение характерно для таких примесей, как фосфор, мышьяк (потоки в пределах $10^8 \dots 10^{18}$ ат/см²·с достигаются изменением температуры на $100 \dots 150$ °C), несколько более плавное — для сурьмы (тот же диапазон потоков при изменении температуры на 200 °C). Что касается акцепторных примесей, то приемлемые зависимости наблюдаются для галлия, алюминия. Бор, широко используемый для легирования в других методах эпитаксии, начинает эффективно испаряться только при температурах около 1500 °C, что затрудняет его использование в МЛЭ, если методом легирования выбрано испарение легирующей примеси.

Второй метод легирования наращиваемой эпитаксиальной пленки состоит в имплантации ионов из ускоренных ионных пучков. Для ускорения ионов используются невысокие ускоряющие напряжения, изменяющие энергию ионов в пределах $400 \dots 800$ эВ. Ионный пучок вводится в рабочую камеру, сканируется в горизонтальном и вертикальном направлениях и смешивается с пучком молекул кремния на подложке. Обычно поверхность подложки покрыта слоем SiO_2 , поэтому начальный период роста эпитаксиальной

ного слоя может иметь существенные отличия. Очистить поверхность от окислов можно воздействием ионов при использовании метода ионно-молекулярных пучков. В этом методе в молекулярные пучки включается полная составляющая. Ионный пучок средних энергий (1...15 кэВ) действует непосредственно на поверхность и приповерхностную область в несколько атомных слоев, разрушая окисные слои.

5.4. ГЕТЕРОЭПИТАКСИЯ КРЕМНИЯ НА САПФИРЕ

Гетероэпитаксия по сравнению с автоэпитаксией — более общий процесс, поскольку соответствует закономерному срастанию двух веществ с различными химическим составом, кристаллической структурой и физическими свойствами.

Эти различия срастающихся веществ обуславливают нарушение непрерывности кристаллической системы и несоответствие расположений атомов по обе стороны от поверхности раздела. Поэтому особенности процесса гетероэпитаксии проявляются, в основном, на начальном этапе осаждения, когда формируется переходный эпитаксиальный слой. После образования сплошного эпитаксиального слоя дальнейшее осаждение вещества происходит в соответствии с закономерностями автоэпитаксии.

Сапфир $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и кремний имеют различную кристаллическую структуру. Поэтому основным вопросом, который встает при проведении гетероэпитаксии, является установление тех кристаллографических плоскостей сапфира, на которых можно наиболее качественно нарастить эпитаксиальные слои кремния главных кристаллографических плоскостей (111), (100) и (110).

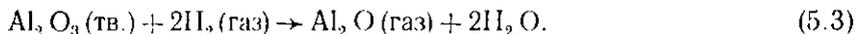
Установлено, что для качественного наращивания кремния заданной ориентации необходимо, чтобы плотность упаковки атомов на поверхности сапфира совпадала с плотностью упаковки атомов в плоскости кремния заданной ориентации, а расположение атомов в этих плоскостях были бы по возможности близкими. Гетероэпитаксиальные слои кремния на сапфире (КНС) получают осаждением из газовой фазы на основе реакции пиролитического разложения силана.

Для исключения самовоспламенения силана на воздухе используются газовые смеси водорода и силана с низким содержанием последнего.

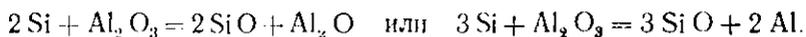
Скорость осаждения кремния определяется температурой, скоростью газового потока и концентрацией SiH_4 в газовой смеси. Эпитаксиальные слои с совершенной структурой образуются при температуре 1050...1100 °С, скорости газового потока 12...15 см³/с

и концентрации SiH_4 в диапазоне 0,08 .. 0,15%. При этом скорость роста составляет 0,25 ... 0,4 мкм/мин.

Качество эпитаксиального слоя кремния в большой мере зависит от технологии обработки сапфировых подложек перед процессом осаждения. Механическая обработка подложек приводит к возникновению на поверхности нарушенного слоя. Для удаления нарушенного слоя проводится термический отжиг в вакууме при $T=1600^\circ\text{C}$ с последующей обработкой в среде водорода при $T=1400^\circ\text{C}$ непосредственно перед гетероэпитаксией. При этом происходит реакция



Указанная реакция происходит также в реакционной камере и вызывает автолегирование нарастающего слоя кремния алюминием. Помимо этого автолегирование алюминием является результатом взаимодействия кремния с сапфиром:



Автолегирование, наряду с диффузией из подложки, приводит к высокой концентрации алюминия в эпитаксиальном слое (10^{16} ... 10^{18} см⁻³ для различных температур процесса наращивания).

Высокое содержание алюминия и наличие дефектов кристаллической структуры приводят к снижению подвижности носителей заряда.

5.5. МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ

Наибольший интерес в производственных условиях представляют измерения толщины и удельного сопротивления эпитаксиальных слоев.

Для определения толщины эпитаксиального слоя используется метод косого шлифа с последующим окрашиванием, позволяющим выявить границы слоя в структурах типа p - n , n ⁺- n , p ⁺- p . Этот метод аналогичен методу, используемому при изучении диффузионных слоев (гл. 3).

Специфический метод для определения толщины эпитаксиальных слоев основан на оценке размеров дефектов упаковки. Дефекты упаковки являются следствием неправильного положения атомов кремния при встраивании их в кристаллическую решетку. В результате возникает локализованная область, кристаллически не согласующаяся с окружающим ее материалом эпитаксиальной

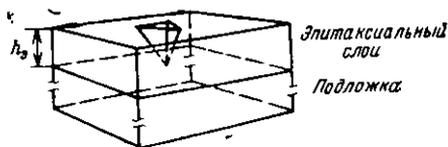


Рис. 5.13. Изображение дефекта упаковки в эпитаксиальном слое с ориентацией $\langle 111 \rangle$

пленки. Схематическое изображение дефекта упаковки в эпитаксиальном слое на подложке с ориентацией $\langle 111 \rangle$ представлено на рис. 5.13. Обработка в селективных травителях позволяет выявить выход дефекта упаковки на поверхность слоя в виде характерной фигуры травления, например равносторонний треугольник на плоскости $\langle 111 \rangle$. Толщина эпитаксиального слоя h_2 связана с длиной стороны треугольника L соотношением $d_2 = L \sqrt{2/3} = 0,816L$. Следует отметить, что для определения толщины слоя должны быть использованы только те дефекты, которые зародились на границе между слоем и подложкой. Они отличаются от дефектов, возникших в самом эпитаксиальном слое, наибольшими размерами фигур травления.

Для иной ориентации подложек вид фигур травления изменится. Однако в любом случае с помощью простых геометрических соотношений можно установить связь между размером отдельных элементов фигур и толщиной эпитаксиального слоя.

Для измерения удельного сопротивления эпитаксиальных слоев разработан ряд методов. Четырехзондовый метод, описанный в § 3, используется для определения удельного сопротивления p - n и n - p эпитаксиальных структур. При необходимости исследования структур типа n^+n и p^+p в реактор для эпитаксиального наращивания помещаются наряду с подложками n^+ (или p^+) типов эталонные высокоомные подложки противоположного типа проводимости. По измерению этих эталонных образцов устанавливаются удельное сопротивление эпитаксиального слоя рабочих структур.

Трехзондовый метод используется для измерения n^+n и p^+p эпитаксиальных структур. Метод основан на измерении пробивного напряжения точечного диода, выполненного на эпитаксиальном слое. Это напряжение сравнивается с данными калибровочной кривой, характеризующей зависимость пробивных напряжений точечных диодов от удельного сопротивления кремния.

Метод определения удельного сопротивления по вольт-фарадным характеристикам основан на измерении зависимости емкости p - n переходов, изготовленных на эпитаксиальных слоях, от запирающего напряжения.

6.1. ВВЕДЕНИЕ

В современной технологии изготовления интегральных микросхем тонкие пленки (толщина до 5 мкм) нашли широкое применение и выполняют разнообразные функции.

В кремниевых микросхемах тонкие диэлектрические пленки используются как маскирующие покрытия при создании локальных легированных областей. Они выполняют также защитную роль, предохраняя выход *p-n* перехода на поверхность кремния от воздействия окружающей среды на всех этапах создания микросхемы. В дальнейшем защитные пленки обеспечивают стабильность электрических характеристик микросхем в процессе эксплуатации. Они создают диэлектрическую изоляцию между различными уровнями электрической разводки. В МОП-микросхемах диэлектрические пленки являются структурными элементами транзисторов, обеспечивая электрическую изоляцию затворов. Тонкие проводящие пленки используются для создания затворов МОП-микросхем, контактных областей и электрической разводки.

В тонкопленочных микросхемах на основе пленок создаются пассивные элементы. При этом находят применение тонкие пленки из материалов с высокой и низкой электропроводностями (диэлектрические и резистивные). Тонкие диэлектрические пленки, как и в кремниевых микросхемах, создают электрическую изоляцию между различными слоями в микросхемах с многоуровневой металлизацией. Нанесенные на поверхность готовой микросхемы, они защищают ее от механических повреждений. Тонкие пленки металлов связывают активные и пассивные элементы, образуют контактные площадки. Кроме того, как в полупроводниковых, так и в тонкопленочных микросхемах пленки используются как технологические элементы, например в качестве контактных масок при диффузии и напылении.

В кремниевых микросхемах наиболее широко используются пленки двуокиси кремния, нитрида кремния, поликристаллического кремния (поликремния), силицидов металлов, металлов (алюминия, титана, золота). Пленки двуокиси кремния SiO_2 защищают *p-n* переходы микросхемы от воздействия окружающей среды на различных этапах технологического процесса. Они выполняют роль маски при локальной диффузии и локальном ионном введении примесей. В современных МОП-микросхемах основным ма-

териалом подзатворного диэлектрика остается пленка SiO_2 . Пленки двуокиси кремния, легированные фосфором (фосфоросиликатные стекла), используются в качестве покрытия для сглаживания поверхностного рельефа в микросхемах перед созданием электрической разводки. Кроме того, они предохраняют микросхемы от проникновения дестабилизирующих ионов щелочных металлов.

В технологии биполярных и МОП-БИС и СБИС широко используются пленки нитрида кремния двух составов — Si_3N_4 и SiN . Пленками Si_3N_4 маскируют подложки при локальном окислении в процессах создания межэлементной изоляции, их используют в качестве подзатворного диэлектрика наряду с SiO_2 в МОП-структурах с двухслойным диэлектриком. Пленки SiN осаждают на поверхность готовых микросхем для защиты от механических воздействий и влияния окружающей среды.

Поликремний используется для затворов в МОП-транзисторах и электрической разводки. Обычно для этого поликремний легируют донорной примесью. Поликремний, осажденный в областях контактных окон, может не только создавать омический контакт к какому-либо слою структуры, но и быть источником примеси для образования самого слоя. Эта двойная функция поликремния особенно важна при создании неглубоких *p-n* переходов, получение омического контакта к которым затруднено. Нелегированный поликремний используется при создании некоторых типов межэлементной изоляции.

Пленки металлов и соединений металлов используются для изготовления электрической разводки, при этом применяются как однослойные металлические пленки, так и многослойные композиции.

Существует много методов получения тонких пленок. Наибольшее распространение получили следующие: термическое окисление кремния; вакуумное термическое напыление; ионно-плазменное напыление; осаждение из парогазовых смесей. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от материала пленки и ее назначения.

6.2. ПОЛУЧЕНИЕ ПЛЕНОК ДВУОКИСИ КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ОКИСЛЕНИЯ КРЕМНИЯ

Основное назначение пленок двуокиси кремния в планарной технологии микросхем состоит в их маскирующих и защитных функциях. Поскольку и в том, и в другом случаях пленки SiO_2 располагаются непосредственно на поверхности кремния, для их создания может быть использован метод реактивной диффузии в

кремний кислорода или паров воды. В результате этой диффузии, проводимой при высоких температурах, и химических реакций окисления на поверхности кремния образуется пленка SiO_2 . Процесс получил название «термическое окисление».

Законы роста пленок SiO_2 при термическом окислении кремния. Для описания механизма роста тонких (до 0,015 мкм) пленок SiO_2 на поверхности кремния привлекают теорию Мотта — Кабреры, в основе которой лежат следующие представления. При контакте кислорода с поверхностью кремния происходит адсорбция кислорода и образование монослоя SiO_2 . Между адсорбированными молекулами кислорода и поверхностью происходит электронный обмен. Молекула кислорода получает электрон и заряжается отрицательно, а поверхностные атомы теряют электрон и заряжаются положительно. Таким образом, на поверхности образуется двойной электрический слой. Так как расстояние между отрицательно заряженными молекулами кислорода и положительным зарядом приповерхностного слоя мало, то в зазоре образуется сильное электрическое поле (порядка $10^6 \dots 10^7$ В/см) под действием которого отрицательные ионы кислорода проходят через слой SiO_2 и вступают в реакцию с кремнием. С увеличением толщины пленки SiO_2 электрическое поле падает, что вызывает уменьшение скорости роста пленки. Если процесс происходит при достаточно высокой температуре, то существенное значение приобретает процесс диффузии ионов кислорода. Механизм роста пленок усложняется.

Теория роста толстых пленок (более 0,1 мкм) состоит в следующем. Реакция окисления кремния происходит на его поверхности, а после образования пленки SiO_2 — на границе раздела SiO_2 —Si, куда вследствие диффузии доставляется окислитель.

Процесс термического окисления включает диффузию окислителя из газовой среды к поверхности кремния, диффузию окислителя через уже выросший слой диоксида кремния и химическую реакцию на границе раздела SiO_2 —Si. Математически данные процессы могут быть охарактеризованы тремя потоками:

1) потоком окислителя в газовой среде $F_1 = h(C^* - C_0)$, где C_0 — концентрация окислителя в SiO_2 на границе с газовой средой; C^* — предельная концентрация окислителя в SiO_2 при заданных температуре и давлении окислителя в газовой среде, достигаемая при $t \rightarrow \infty$, когда наступает равновесие и поток окислителя к поверхности SiO_2 прекращается; h — коэффициент пропорциональности, характеризующий массоперенос окислителя;

2) потоком окислителя в пленке $F_2 = \mathcal{D}(C_0 - C_1)/x$, где C_1 — концентрация окислителя на границе SiO_2 —Si; x — толщина пленки SiO_2 в текущий момент;

3) потоком $F_3 = kC_1$, связанным со скоростью химической реакции на поверхности раздела кремния и SiO_2 , где k — константа химической реакции.

Из условия, что в установившемся состоянии $F_1 = F_2 = F_3 = F$, можно определить поток окислителя:

$$F = N \frac{dx}{dt} = kC^* \left/ \left(1 + \frac{k}{h} + \frac{kx}{\mathcal{D}} \right) \right.$$

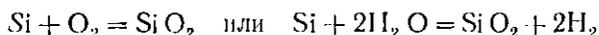
где N — число молекул окислителя в единице объема окисла. Это уравнение

решается в предположении, что при $t=0$, $x=x_i$, т. е. на поверхности кремния имеется слой окисла, выращенный в предыдущем процессе.

Решением уравнения являются соотношения $x^2+Ax=B(t+\tau)$, где $A=2\mathcal{D}C^*/N$, $B=2\mathcal{D}C^*/N$, $\tau=(x_i^2+Ax_i)/B$. Это решение сводится к линейному и параболическому законам соответственно при малых и больших временах. Если $t+\tau \ll A^2/4B$, то $x=B(t+\tau)/A$, если $t \gg \tau$, то $x^2=Bt$, где x — толщина пленки, а t — время роста. Численные значения констант B и B/A зависят от типа окислителя.

Обычно в качестве окислителя используют либо сухой кислород, либо смесь кислорода и паров воды (влажный кислород). Окисляемые пластины кремния помещаются в горизонтальный реактор, в котором поддерживается высокая температура (1000... 1250 °С). Через реактор проходит поток окислителя.

При окислении происходят реакции:



Скорости роста пленок SiO_2 в парах воды существенно выше, чем в сухом кислороде (табл. 6.1). Это может быть связано с большим различием в значениях предельной концентрации окислителя в SiO_2 , которые для кислорода и паров воды соответственно составляют $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Таблица 6.1. Константы скорости окисления в сухом и влажном кислороде

| Температура окисления, °С | Константа для линейного закона, мкм·ч | | Константа для параболического закона, мкм ² ·ч | |
|---------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|------------------------|
| | сухой O ₂ | влажный O ₂ | сухой O ₂ | влажный O ₂ |
| 1000 | 0,071 | 1,27 | 0,0117 | 0,287 |
| 1100 | 0,3 | 4,64 | 0,027 | 0,510 |
| 1200 | 1,12 | 14,49 | 0,045 | 0,720 |

При выращивании пленок SiO_2 обычно чередуют использование сухого и влажного кислорода. Выращивание пленок на первом этапе во влажном кислороде позволяет ускорить процесс получения пленки SiO_2 заданной толщины. Проведение второго этапа процесса в сухом кислороде позволяет улучшать электрические и защитные свойства пленок благодаря удалению воды, уплотнению выращенной на первом этапе пленки и снижению положительного заряда в ней.

Поднимать скорость роста пленок SiO_2 можно, повышая давление водяных паров. Переход от атмосферного давления 10^5 Па к повышенному до $2 \cdot 10^6$ Па увеличивает параболическую константу роста примерно в 20 раз, что позволяет получать толстые

слои SiO_2 за сравнительно короткие промежутки времени. Кроме того, метод позволяет выращивать слои SiO_2 при низких температурах, начиная с 800°C .

Снижение температуры уменьшает боковую диффузию кислорода при локальном окислении кремния, что, как будет показано в гл. 8, позволяет повышать плотность компоновки элементов в микросхемах.

Пример. Найти длительность процесса получения пленки SiO_2 толщиной $0,4$ мкм при окислении во влажном и сухом (одна четверть общего времени) кислороде при температуре $T = 1100^\circ\text{C}$, полагая, что пленка растет по параболическому закону $x^2 = Bt$.

В соответствии с табл. 3.1 константы окисления для параболического закона при $T = 1100^\circ\text{C}$ равны для сухого и влажного кислорода $B_1 = 0,027$ и $B_2 = 0,51$ соответственно. Тогда получим $x^2 = 0,75 \cdot B_2 \cdot t + 0,25 \cdot B_1 \cdot t$; $(0,4)^2 = (0,75 \cdot 0,51 + 0,25 \cdot 0,027) \cdot t$; $t = 0,4$ ч.

Окисление кремния в галогеносодержащих средах. Особо высокие требования предъявляются к пленкам SiO_2 , используемым в качестве подзатворного диэлектрика в приборах, включающих МОП-структуру (МОП-транзисторах и микросхемах на их основе, приборах с зарядовой связью). Эти требования вызваны необходимостью совершенствования электрических характеристик МОП-приборов и повышения их стабильности. Особенность МОП-приборов состоит в том, что их характеристики зависят от электрических свойств границы раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$.

Для термически выращенной пленки SiO_2 характерно наличие двух типов электрически активных центров в граничной области — положительного фиксированного заряда и ловушек. Плотности фиксированного заряда и ловушек зависят от кристаллографической ориентации кремниевой подложки. Они в два-три раза меньше для поверхности (100), чем для поверхности (111). Наличие положительного фиксированного заряда приводит к увеличению порогового напряжения в p -канальных МОП-транзисторах и снижению напряжения пробоя стока, поскольку в отсутствие напряжения на затворе этот заряд притягивает к поверхности электроны, в результате вблизи нее переход стока образуется двумя сильно легированными p^+ и n^+ -областями.

Заряженные ловушки действуют аналогично фиксированному заряду, однако их полярность может быть и положительной и отрицательной. Повышение плотности ловушек на границе раздела $\text{Si} - \text{SiO}_2$ приводит к снижению крутизны вольт-амперной характеристики МОП-транзистора, поскольку уменьшается плотность заряда в канале и требуется большее изменение напряжения на затворе для получения заданного изменения проводимости канала. Кроме того, и ловушки, и фиксированный заряд могут приводить к снижению подвижности носителей заряда в канале.

На стабильность МОП-структур, помимо фиксированного заряда и ловушек, влияют подвижные ионы в SiO_2 , которые возникают в пленках при их загрязненности щелочными металлами, особенно натрием. Основное количе-

ство натрия вводится в пленки SiO_2 в высокотемпературных процессах их выращивания и отжига. Источником натрия в окислительной среде в установках для термического окисления является кварц, из которого изготавливается реакционная камера. Более высокое содержание натрия наблюдается при окислении в смеси кислорода и паров воды, поскольку присутствие паров воды способствует выщелачиванию натрия из кварца. Кроме того, возможно загрязнение поверхности натрием при ее металлизации. В процессе концентрация вносимого заряда может изменяться в пределах от 10^{10} до 10^{12} см^{-2} , возрастая при переходе от электронно-лучевого испарения алюминия к резистивному испарению алюминия, а затем к резистивному испарению золота (указанные методы получения металлических пленок рассмотрены в § 6.3).

Загрязнение пленок двуокиси кремния натрием существенно уменьшается при термическом окислении кремния в галогеносодержащих средах, например $\text{O}_2 - \text{HCl}$ (концентрация HCl в пределах от 0 до 10 %) и $\text{O}_2 - \text{Cl}_2$ (концентрация Cl_2 в пределах 0 ... 2,5 %). Снижается подвижный заряд в пленках SiO_2 и при обработке их в смеси кислорода и трихлорэтилена ($\text{O}_2 - \text{C}_2\text{HCl}_3$). В поток кислорода добавляется пар C_2HCl_3 при пропускании через питатель с C_2HCl_3 сухого азота.

Концентрация подвижного заряда в SiO_2 зависит и от предварительной обработки кварцевого окислительного реактора. Обработка в тех же средах, что и процесс окисления, приводит к снижению подвижного заряда. Если содержание вносимого заряда при окислении в чистом (без галогеносодержащих добавок) кислороде составляет около 10^{11} см^{-2} , то при добавлении 6 % HCl происходит его снижение практически до нуля (до предела точности измерений концентрации подвижного заряда существующими методами).

Влияние хлорсодержащих добавок на концентрацию подвижного заряда можно объяснить образованием $\text{Si}-\text{O}-\text{Cl}$ -комплексов, которые способны захватывать и нейтрализовать ионы натрия. На основе экспериментальных исследований процессов окисления в среде $\text{O}_2 - \text{HCl}$ установлен ряд закономерностей образования $\text{Si}-\text{O}-\text{Cl}$ -комплексов:

вероятность образования комплексов зависит от температуры и резко уменьшается при $T = 1100^\circ\text{C}$;

вероятность образования комплексов уменьшается при увеличении концентрации паров воды в окислительной атмосфере;

вероятность образования комплексов нелинейно зависит как от содержания HCl , так и от времени проведения процесса окисления;

образование комплексов возможно и в толстых (более 850 нм) пленках SiO_2 при их доразращении в хлорсодержащей среде;

вероятность образования комплексов зависит от ориентации окисляемой поверхности: выше для плоскости (111), чем для плоскости (100).

Защитные и маскирующие свойства пленок SiO_2 . Защитные свойства пленок SiO_2 определяются, в первую очередь, параметрами, характеризующими их как диэлектрики. Удельное электрическое сопротивление термически выращенной SiO_2 составляет

$10^{15} \dots 10^{16}$ Ом·см, электрическая прочность лежит в пределах $10^6 \dots 10^7$ В/см.

Маскирующие свойства пленок SiO_2 определяются коэффициентами диффузии основных донорных и акцепторных примесей в SiO_2 и Si (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Коэффициенты диффузии примесей в Si и SiO_2 (при $T = 1150^\circ\text{C}$)

| Коэффициент диффузии | Примесь | | | |
|--|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Sb | P | B | Ga* |
| $D(\text{SiO}_2)$, cm^2/c | 10^{-14} | $2,1 \cdot 10^{-15}$ | $1,2 \cdot 10^{-16}$ | $5,3 \cdot 10^{-11}$ |
| $D(\text{Si})$, cm^2/c | $9 \cdot 10^{-14}$ | $1,3 \cdot 10^{-12}$ | $1,3 \cdot 10^{-12}$ | $6,1 \cdot 10^{-13}$ |

* Для Ga коэффициенты диффузии приведены для $T = 1100^\circ\text{C}$

Необходимо учитывать, что приведенные данные ориентировочны, поскольку коэффициенты диффузии сильно зависят от условий получения SiO_2 и проведения процессов диффузии.

Перераспределение примесей на границе Si— SiO_2 . В процессе термического окисления на поверхности кремния образуется либо истощенный, либо насыщенный примесью слой, благодаря уходу части примеси в образующийся SiO_2 или, наоборот, отталкиванию примеси из окиси и накапливанию ее в приповерхностном слое кремния. Истощение или накопление примеси в приповерхностном слое зависит от коэффициента распределения (сегрегация) примесей между двумя фазами (Si и SiO_2). Этот коэффициент (k) определяется как отношение концентрации примеси в Si к концентрации примеси в пленке SiO_2 .

В табл. 6.3 представлены ориентировочные значения коэффициента k . Как видим, для бора и алюминия $k < 1$, а для других элементов $k > 1$. Схематично концентрационные профили в Si и SiO_2 представлены на рис. 6.1.

Таблица 6.3. Коэффициент распределения примесей между Si и SiO_2

| Примесь | Ga | Jn | B | Al | P | As |
|---------|--------|--------|-------------------|-----------|----|--------|
| k | 10^3 | 10^3 | $3 \cdot 10^{-1}$ | 10^{-3} | 10 | 10^3 |

Перераспределение примесей на границе Si— SiO_2 может сказаться на их концентрационном профиле в структурах создаваемых приборов при одновременном проведении процессов диффузии и окисления.

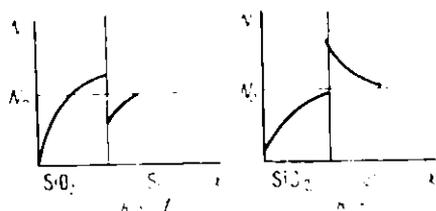


Рис. 6.1. Концентрационные профили в Si и SiO₂ для различных коэффициентов распределения

Если исходный кремний легирован донорными и акцепторными примесями близких концентраций (т. е. материал имеет большое удельное сопротивление), то на поверхности из-за перераспределения примесей может образоваться слой с типом проводимости, противоположным типу проводимости исходного кремния. Так, если легирующими примесями являются бор и фосфор, а кремний имеет проводимость *p*-типа, то при окислении поверхность обогащается фосфором и обедняется бором, что может вызвать образование инверсного слоя *n*-типа, который называют «каналом».

Из явления перераспределения можно объяснить зависимость скорости окисления от степени легирования кремния некоторыми примесями. Так, с повышением концентрации бора скорость окисления кремния повышается.

6.3. ВАКУУМНОЕ ТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ

По этому методу тонкие пленки получаются в результате нагрева и испарения вещества и осаждения его на подложку в замкнутой камере при сниженном давлении газа в ней.

Устройство установок для вакуумного термического напыления. Схема установки представлена на рис. 6.2. В современных установках для вакуумного напыления замкнутая (рабочая) камера образуется колпаком из нержавеющей стали и опорной плитой. Вакуумплотное соединение основания колпака с опорной плитой достигается при помощи резиновой прокладки. Типичные размеры рабочей камеры: диаметр 500 мм, высота колпака 450 ... 650 мм. Предельное давление остаточных газов $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па.

В рабочей камере размещена технологическая оснастка: держатель подложки, нагреватель подложки, испаритель напыляемого вещества, управляемая от электромагнита заслонка для прерывания потока напыляемого вещества, вводы электропитания и др. В установках промышленного типа предусмотрена возможность многократного напыления без разгерметизации рабочей камеры. Для этого создаются карусели подложек и испарителей, способные перемещаться в вакууме относительно друг друга. Наличие

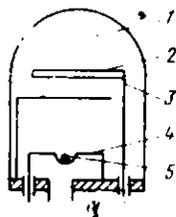


Рис. 6.2. Схема установки для вакуумного напыления:

1 — рабочая камера; 2 — подложка; 3 — напыленная пленка; 4 — испаритель; 5 — испаряемое вещество

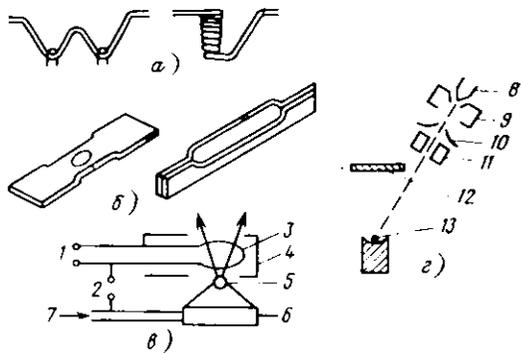


Рис. 6.3. Конструкции и схемы испарителей:

а — проволочные испарители; б — ленточные испарители; в — электронно-лучевой испаритель с испаряемым анодом; г — электронная пушка с независимым анодом; 1 — напряжение накала; 2 — высокое напряжение; 3 — катод прямого накала; 4 — экран; 5 — испаряемый материал; 6 — охлаждаемая сердечник; 7 — вода; 8 — катод прямого накала (10—20 кВ); 9 — управляющий электрод; 10 — анод; 11 — магнитная линза; 12 — подложка; 13 — испаряемое вещество

каруселей позволяет, испаряя различные вещества с разных испарителей, получать многослойные тонкие пленки.

Для нагрева напыляемого вещества используются, в основном, два типа испарителей: проволочные и ленточные с резистивным нагревом, изготовленные из тугоплавких материалов; электронно-лучевые с нагревом испаряемого вещества электронной бомбардировкой (рис. 6.3).

Специальный тип испарителя используется для проведения так называемого взрывного испарения. Взрывное испарение применяется для напыления пленок из многокомпонентных материалов (сплавов или смесей) с различным давлением паров компонентов. Воспроизведение состава испаряемого материала в пленке достигается полным испарением малых порций материала, непрерывно подаваемых на испаритель, температура которого (обычно около 2000°C) достаточна для испарения наименее летучего компонента. Испаряемый материал в виде мелких гранул размером от 0,1 до 0,8 мм подается на испаритель из контейнера за счет вибраций.

Для нагрева подложек используется резистивный нагреватель. Температура нагрева обычно варьируется в пределах от 100 до 400°C .

Факторы, влияющие на толщину пленки. Толщина пленок, полученных методом вакуумного напыления, зависит от эмиссионных свойств источника, характеризующих распределение в пространстве потока испаряемого вещества, от

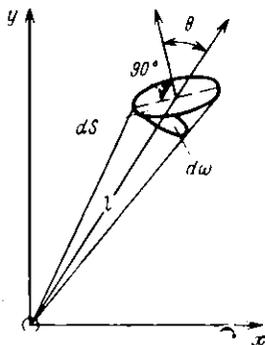


Рис. 6.4. Схема испарения из точечного источника

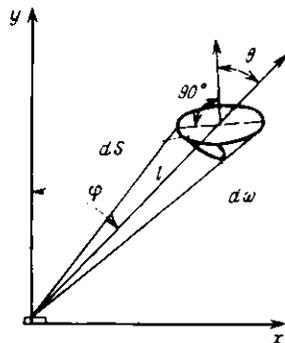


Рис. 6.5. Схема испарения из поверхностного источника

геометрии и местоположения подложки и источника, от скорости и времени испарения напыляемого вещества. Испарители по эмиссионным свойствам принято классифицировать на точечные и поверхностные.

Точечный источник представляет собой малую сферу (диаметр сферы мал по сравнению с расстоянием от источника до подложки), с единицы поверхности которой во всех направлениях испаряется G , г/см²·с, вещества. Количество вещества, проходящего внутри телесного угла $d\omega$ в любом направлении в единицу времени равно $dG = AGd\omega/4\pi$, где A — поверхность сферы. Рассмотрим случай, когда испаряемый материал поступает на площадку dS , наклоненную к направлению потока паров под углом θ (рис. 6.4). Количество вещества, попадающего на dS равно $dG' = AG \cos \theta dS/4\pi l^2$, где l — расстояние от источника до площадки dS . Толщина пленки, образующейся за единицу времени, при испарении из точечного источника равна $h = AG \cos \theta/4\pi l^2 \rho$, где ρ — плотность испаряемого материала.

Поверхностный источник представляет собой малую площадку, с одной стороны которой с единицы площади испаряется G , г/см²·с, вещества. В этом случае количество вещества, проходящего в единицу времени в телесном угле $d\omega$, образующем угол φ с нормалью к поверхности источника, равно $dG = AG \cos \varphi d\omega/\pi$. Если испаряемый материал поступает на площадку dS , наклоненную к направлению потока паров под углом θ (рис. 6.5), то для поверхностного источника количество вещества, попадающего на площадку dS равно $dG' = AG \cos \theta \cos \varphi dS/\pi l^2$, а толщина пленки, образующейся за единицу времени, при испарении из поверхностного источника равна $h = AG \cos \theta \cos \varphi/\pi l^2 \rho$.

На практике при изготовлении микросхем пленки напыляются на плоские подложки. Поэтому для получения однородной по толщине пленки необходимо уменьшать угол φ , увеличивая расстояние от источника напыляемого вещества до подложки.

Пример. Найти расстояние от поверхностного источника до подложки для

получения пленки с разбросом по толщине в пределах 10 % на подложке диаметром 100 мм.

В центре подложки поток излучения нормально падает на поверхность, и толщина пленки равна $h_n = C/l^2$, где $C = AG/\pi l$. На краях подложки косинусы углов φ и θ составляют $l/\sqrt{(D/2)^2 + l^2}$, а толщина $h_n = C/[(D/2)^2 + l^2]$. Если $h_n > 0,9h_n$, то $h_n/h_n = l^2/[(D/2)^2 + l^2] = 0,9$; $l = 3/2D = 150$ мм.

Факторы, влияющие на чистоту пленки. Загрязнение пленки происходит вследствие соударения молекул испаряемого вещества с молекулами остаточных газов. Соударения происходят либо в объеме рабочей камеры, либо непосредственно на подложке. При таких соударениях могут образовываться химические соединения распыляемого вещества с составляющими остаточного газа. Конденсирующиеся на подложке молекулы этих соединений, а также молекулы остаточного газа включаются в растущую пленку, изменяя ее электрические свойства.

Для уменьшения загрязненности напыляемой пленки необходимо выполнение двух условий: понижение вероятности соударений молекул в вакуумном пространстве и увеличение потока молекул испаряемого вещества, бомбардирующих подложку, по сравнению с потоком молекул остаточных газов.

Вероятность соударения молекул в вакуумном пространстве определяется соотношением: $\alpha = 1 - \exp(-l/L)$, где l — расстояние между испарителем и подложкой, L — средняя длина свободного пробега молекул. Согласно кинетической теории газов $L = kT/\sqrt{2}nd^2P$, где d — эффективный диаметр молекул; P — давление в вакуумной камере, Па. Если проводить процесс напыления при давлении $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па ($L \approx 70$ м) и расстояниях испаритель — подложка 10...30 см, то только ничтожная часть молекул испаряемого вещества будет сталкиваться с молекулами остаточных газов.

Для снижения числа соударений на подложке необходимо уменьшать отношение потока молекул остаточного газа v_r , $\text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, к потоку молекул напыляемого вещества v_n . Поток остаточного газа (число молекул, поступающих за единицу времени на единичную площадку) определяется как $v_r = \frac{1}{4} n v$, где $v = \sqrt{\frac{8RT}{M}}$, $n = P/kT$,

$$v_r = 2,63 \cdot 10^{24} P_r (1/M_r T_r)^{1/2}$$

Здесь P_r — давление, Па, M_r — кмоль и T_r — абсолютная температура остаточного газа, К.

Согласно кинетической теории газов поток испаряемого вещества в вакууме v_n определяется аналогичным выражением, если заменить давление газа P_r на равновесное давление насыщенных

паров испаряемого вещества P_v . Поток молекул вещества, поступающих на подложку v_{v-n} , будет зависеть от эмиссионных свойств испарителя и, например, для точечного источника будет равен $v_{v-n} = av_v \cos \theta / 4\pi l^2$.

Число молекул, фактически сконденсировавшихся на поверхности в единицу времени, не равно числу молекул, ударившихся о поверхность за то же время. Часть адсорбированных молекул, пробыв на поверхности определенное время, может испариться с нее. Среднее время пребывания адсорбированной молекулы на поверхности подложки или, кратко, время жизни молекулы τ зависит от температуры поверхности подложки T_n и от энергии связи между адсорбированными молекулами и молекулами подложки E_c . Для физической адсорбции

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_c}{kT_n}\right),$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с — период колебания молекулы около своего нормального положения.

Таким образом, среднее количество газовых молекул на единице площади будет определяться произведением $v_n \tau$, а количество молекул испаряемого вещества произведением $v_{v-n} \tau_v$, где τ_v и τ_n — их времена жизни соответственно. Степень загрязненности пленки можно характеризовать отношением этих количеств δ , которое для точечного источника равно:

$$\delta = \frac{v_v \tau_v}{v_n \tau_n} = \frac{P_v (T_v M_v)^{-1/2} \exp\left(\frac{E_{cv}}{kT_v}\right)}{P_n (T_n M_n)^{-1/2} \exp\left(\frac{E_{cn}}{kT_n}\right)} \cdot \frac{4\pi l^2}{a \cos \theta}.$$

Оно определяется соотношением давлений остаточных газов и паров испаряемого вещества (а следовательно, его температурой), температурой подложки и природой остаточных газов и испаряемого вещества.

Уменьшить загрязненность напыляемой пленки можно использованием форсированного режима испарения, который состоит в превышении на 15 ... 30 °С температуры испаряемого вещества по сравнению с его температурой испарения, при которой давление пара вещества равно 1,333 Па. Как показывает зависимость давления пара различных веществ от температуры, представленная на рис. 6.6, такое превышение приводит к возрастанию давления пара примерно на порядок. Следовательно, использование такого режима позволяет увеличивать поток испаряемого вещества, что, в конечном счете, приводит к уменьшению загрязненности пленки молекулами остаточных газов.

Стремясь снизить загрязненность пленки, следует учитывать, что давление остаточных газов не сохраняется постоянным в процессе распыления. Изме-

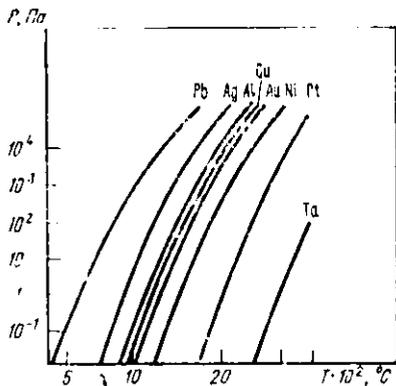


Рис. 6.6. Зависимость давления пара от температуры

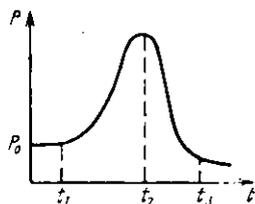


Рис. 6.7. Изменение давления в рабочей камере во времени:

t_1 — включение испарителя; t_2 — момент достижения максимального давления; t_3 — удаление заслонки

ные давления во времени представлено на рис. 6.7. Давление P_0 характеризует состояние вакуумной камеры перед началом процесса распыления. В момент t_1 включается испаритель. Давление остаточных газов возрастает в силу газовой выделенной из нагретых частей арматуры. Начиная с момента t_2 давление остаточных газов снижается. Это снижение обусловлено геттеризирующими свойствами пленки испаряемого вещества, нанесенного на внутреннюю поверхность камеры и арматуры. При этом возможно снижение давления до значений, меньших первоначального P_0 . Чтобы исключить осаждение распыляемого вещества на рабочую подложку в период неустойчивости давления, ее до момента t_3 закрывают заслонкой, которая затем может быть сдвинута без нарушения вакуума.

2

6.4. ИОННО-ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ

Ионно-плазменное напыление происходит в тлеющем разряде и состоит в распылении материала отрицательно заряженного электрода-мишени под действием ударяющихся о него ионизованных атомов газа и осаждении распыленных атомов на подложку.

Для возникновения разряда в газе между двумя электродами — катодом и анодом, расположенными в камере с низким давлением газа, прикладывается постоянное напряжение. Для прохождения тока между электродами необходима постоянная эмиссия электронов с катода. Если эта эмиссия принудительна (на-

пример, нагрев катода, облучение его ультрафиолетовым светом), то такой разряд называется несамостоятельным.

Для возникновения самостоятельного тлеющего разряда необходимо вызвать эмиссию электронов из катода и создать условия для самопроизвольного ее усиления до установления стационарного разряда. Эмиссия электронов может начаться под действием высокого напряжения между электродами. Если приложенное напряжение превышает потенциал ионизации рассматриваемого газа, то при столкновении электронов с молекулами газа последние ионизируются. Возникающие ионы ускоряются электрическим полем и движутся к катоду. Накопление ионов перед катодом приводит к возникновению здесь локализованного пространственного заряда и возрастанию электрического поля. Ионы, приобретающие энергию в этом поле, при бомбардировке катода вызывают эмиссию вторичных электронов из катода. Вторичная эмиссия электронов поддерживает самостоятельный тлеющий разряд, структура которого и распределение потенциала между электродами представлены на рис. 6.8, а, б.

В катодном темном пространстве происходит ускорение положительных ионов, бомбардирующих катод. За счет передачи энергии этих ионов атомам катода происходит распыление материала катода.

Двухэлектродные системы напыления. В наиболее простых установках для ионно-плазменного напыления мишень из распыляемого материала является катодом, а держатель подложек — анодом. Такие системы принято называть двухэлектродными (рис. 6.9). Для эффективного осаждения распыленных атомов на под-

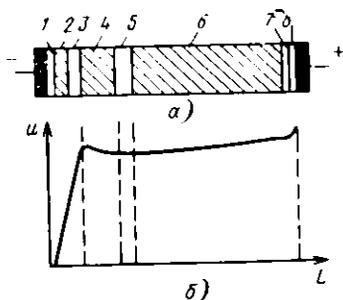


Рис. 6.8. Структура тлеющего разряда:

1 — анодное темное пространство; 2 — катодное свечение; 3 — катодное темное пространство; 4 — отрицательное свечение; 5 — фарлеево темное пространство; 6 — положительный столб; 7 — анодное темное пространство; 8 — анодное свечение;

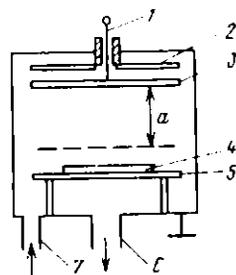


Рис. 6.9. Схема двухэлектродной установки ионно-плазменного распыления:

1 — высоковольтный ввод; 2 — экран; 3 — катод; 4 — подложка; 5 — анод; 6 — выход к откачной системе; 7 — нагнетатель для аргона; a — протяженность катодного темного пространства

ложку она должна располагаться достаточно близко к катоду. Обычно расстояние между катодом и подложкой составляет полторы-две длины темного катодного пространства. Чтобы избежать распыления обратной стороны мишени, арматуры охлаждающих систем, крепления и т. п., используются металлические экраны, имеющие потенциал анода и располагаемые от катода на расстоянии, меньшем длины темного катодного пространства.

При бомбардировке катода ионами происходит удаление материала с его поверхности. Основной механизм взаимодействия между бомбардирующими ионами рабочего газа и атомами материала мишени (катода) — процесс передачи импульса. При этом наиболее важной характеристикой столкновения иона с атомом материала мишени является энергия, которая сообщается атому $E_{\max} = 4m_n m_a E_n / (m_n + m_a)$, где m_n и m_a — массы иона и атома, а E_n — энергия иона.

Ионное распыление начинается, когда энергия ионов превышает некоторую пороговую величину $E_{\text{пор}} = (m_n + m_a)^2 E_{\text{см}} / 4m_n m_a$, где $E_{\text{см}}$ — пороговая энергия смещения атома в материале, связанная с энергией сублимации $E_{\text{суб}}$ (энергия удаления атома с поверхности) соотношением $E_{\text{см}} = HE_{\text{суб}}$. Если энергия меньше пороговой энергии распыления, то материал мишени не разрушается. Ионы с энергией $E_n < E_{\text{пор}}$ могут либо отражаться от поверхности мишени, либо адсорбироваться на ней и нейтрализоваться эмитируемыми с поверхности мишени электронами. При увеличении энергии также происходит их отражение, но ион предварительно выбирает один или несколько атомов материала мишени. При больших энергиях ионы начинают внедряться в материал мишени, смещая его атомы. Обычно для распыления диапазон энергий ионов составляет 0,5 ... 5 кэВ ($8 \cdot 10^{-17}$... $8 \cdot 10^{-16}$ Дж). На распыление материала обычно расходуется около 5 % энергии ионов, основная доля энергии ионов (70 ... 90 %) расходуется на нагрев мишени, остальная энергия — на внедрение ионов и связанные с ним радиационные эффекты. Необходимость эффективного охлаждения мишени является существенной особенностью ионно-плазменного распыления.

На скорость разрушения мишени влияет ряд факторов: энергия бомбардирующих ионов; коэффициент распыления; давление газа в рабочей камере и зависящая от него плотность тока разряда; концентрация остаточных газов; угол падения ионов на поверхность стравливаемой пленки (угловой эффект) и др. Увеличить энергию бомбардирующих ионов можно, увеличивая напряжение между анодом и катодом — мишенью. От энергии ионов зависит коэффициент распыления, определяемый как число атомов, выбиваемых из материала мишени одним ионом $\kappa_p = N_a / N_n$. Практически коэффициент распыления определяется по изменению массы распыленного материала и значению ионного тока, протекающего во внешней цепи с учетом вторичной электронной эмиссии и времени распыления $\kappa_p = N_a q \Lambda m / A I_n t$, где N_a — число Авогадро; q — заряд электрона; l — кратность заряда ионов; Λm и A — количество и атомная масса распыляемого материала; t — время распыления; I_n — ионный ток.

Согласно физической теории распыления коэффициент распыления пропорционально зависит от энергии до некоторого значения $E_{\text{и}}$, которое для многих материалов лежит в пределах 0,3 ... 0,5 кэВ. При более высоких энергиях рост коэффициента распыления замедляется. Естественно, что коэффициент распыления характеризует скорость напыления пленки на подложку. Важную роль играет зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов на поверхность мишени. Практически у всех материалов наблюдается увеличение коэффициента распыления с увеличением угла падения ионов относительно нормали к поверхности. Рост наблюдается в пределах изменения угла от 0 до 70°. При больших углах происходит уменьшение κ вследствие отражения ионов от поверхности. Экспериментально полученные зависимости относительного коэффициента распыления для ряда материалов представлена на рис. 6.10.

Другим фактором, характеризующим скорость напыления, является плотность тока разряда, поскольку она определяет число ионов, падающих на катод. Плотность тока, а следовательно, и скорость напыления растут с повышением давления.

Однако при значительном повышении давления, скорость напыления начинает быстро падать. Это обусловлено двумя явлениями, происходящими в тлеющем разряде: обратной диффузией распыленного материала к мишени (которая, как установлено, наблюдается при давлениях, превышающих приблизительно 17 Па) и перезарядкой ионов в области их ускорения. Последнее явление состоит в том, что ион передает свой заряд нейтральному атому и продолжает двигаться к катоду с прежней скоростью, но уже в нейтральном состоянии, а новый ион имеет только тепловую скорость. В результате часть ионов достигает катода, обладая низкими энергиями, и не вызывает распыления. А быстрые нейтральные атомы в основном отражаются от катода с малой потерей энергии.

Следует учитывать также, что с увеличением давления усложняются задачи, связанные с экранированием катода, поскольку уменьшается длина катодного темного пространства.

Присутствие в камере помимо основного инертного газа (обычно аргона) других, примесных газов (фоновая атмосфера) уменьшает скорость нанесения пленки. Для легких ионов (водород, гелий) уменьшение скорости напыления можно объяснить тем, что эти ионы из-за их высокой подвижности вызывают значительную часть тока, не производя в то же время распыления материала в силу крайне низких значений коэффициентов распыления. Для кислорода — образованием на поверхности катода окисного слоя с меньшим коэффициентом распыления. Например, содержание в рабочей камере 1 % кислорода снижает скорость напыления в два раза.

При увеличении температуры подложки наблюдается заметное снижение скорости напыления (примерно на 10 ... 20 % при изменении температуры от 100 до 400 °С).

К числу факторов, влияющих на однородность пленки по толщине, в первую очередь следует отнести расстояние между мишенью и подложкой. Те из распыленных атомов, которые не пускаются под малыми углами к поверхности катода и испытывают столкновения с атомами газа, могут не попасть на под-

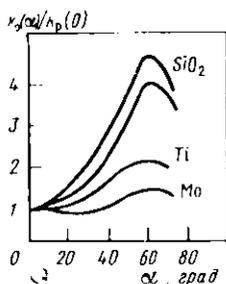


Рис. 6.10. Зависимость относительного коэффициента распыления от угла падения ионов

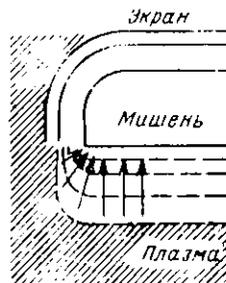


Рис. 6.11. Изменение траекторий ионов на краях мишени

ложку. С увеличением расстояния между катодом и подложкой вероятность этого возрастает. Экспериментальные исследования показывают увеличение толщины пленки на краях подложки. Это можно объяснить увеличением скорости распыления на краях мишени вследствие изменения траекторий ионов (рис. 6.11), приводящего к увеличению плотности тока. Кроме того, у края мишени ионы падают на поверхность под меньшими углами, что для некоторых материалов приводит к увеличению коэффициентов распыления (условий эффект).

Основным источником загрязнения пленок является фоновая атмосфера. Ее возникновение обусловлено теми же факторами, с которыми связано появление остаточных газов при вакуумном напылении. (В процессе ионного напыления первоначально в газоразрядной камере получают высокий вакуум, и затем устанавливают требуемое давление рабочего газа). Здесь также неэффективна заслонка как средство борьбы с загрязнением пленки. Однако при ионном напылении есть и другие способы уменьшить загрязнение пленок. Одним из них является подача на подложку отрицательного смещения относительно анода. При этом становится возможной бомбардировка подложки ионами. Поскольку потенциал подложки невелик, энергия ионов мала и выбиваются преимущественно адсорбированные атомы газов, распыление самой пленки незначительно.

Трехэлектродные системы напыления. Если, сохранив высокую плотность тока, исключить явления перезарядки ионов и обратной диффузии, то можно увеличить скорость распыления. Этого достигают, используя давление газа, при котором средняя длина свободного пробега ионов и распыленных атомов становится сравнимой с областью ускорения ионов и размерами газоразрядной камеры. Однако при уменьшении давления газа граница темного катодного пространства перемещается к аноду, и по достижению его анода разряд прекращается даже при значительном повышении напряжения между электродами. Для большинства распылительных систем это происходит при давлениях около 1,33... 2,66 Па.

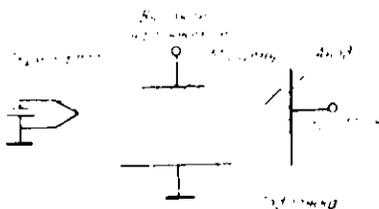


Рис. 6.12. Схема трехэлектродной системы водно-плазменного распыления

Поддерживать разряд при меньших давлениях можно при двух условиях: при наличии, кроме вторичной эмиссии, дополнительного источника электронов; при повышении эффективности газа имеющимся числом электронов. Выполнить эти условия можно в трехэлектродных системах распыления (рис. 6.12). В этих системах дополнительные электроны получают термоэмиссией с нагреваемого катода. Между катодом и анодом возникает дуговой разряд. Эмитируемые электроны в атмосфере низкого давления ионизируют атомы газа. В результате медленными электронами и положительными ионами вблизи катода образуется двойная оболочка, ограничивающая темное пространство, в котором высокое электрическое поле создается при сравнительно низких напряжениях (около 50 ... 100 В). При этом можно получить ток в несколько ампер. В плазму дугового разряда вводится мишень из распыляемого материала, на которую подается высокое отрицательное напряжение. Напротив мишени располагается подложка, относительно которой на анод подается положительное смещение с тем, чтобы на нее не отклонялись электроны, летящие с термо катода. Около мишени создается область пространственного заряда, под действием электрического поля ионы плазмы ускоряются и вызывают распыление мишени.

В такой трехэлектродной системе, не используя магнитные поля, можно повышать эффективность ионизации электронами атомов газа. Магнитное поле изменяет характер движения электронов, а именно, заставляет их двигаться по спиральным траекториям вокруг силовых линий магнитного поля. Поэтому эффективная длина пути электрона возрастает.

В трехэлектродных системах распыление может осуществляться при давлениях около 0,67 Па вместо 4 ... 6,6 Па для двухэлектродных систем. Напыление при более низких давлениях способствует улучшению структуры и адгезии пленок, поскольку в данном случае распыленные атомы достигают подложки, имея высокие энергии, и могут проникать в подложку на глубину от одного до двух атомных слоев.

Разновидностью ионного напыления является реактивное напыление. При реактивном напылении в газоразрядную камеру вводится химически активный газ. Образующаяся пленка представля-

ет собой химическое соединение материала мишени и газа. В технологии микросхем реактивное распыление используется для получения диэлектрических пленок оксидов, нитридов и других соединений.

Высокочастотное напыление диэлектриков. Рассмотренные системы позволяют распылять только металлы. Если материал мишени — диэлектрик или полупроводник с высоким сопротивлением, то на поверхности мишени возникает заряд положительных ионов, который препятствует дальнейшей бомбардировке. Влияние положительного заряда можно предотвратить, подавая на электроды переменное напряжение. В ту часть периода, когда напряжение на мишени отрицательно, происходит процесс ее распыления, сопровождаемый накоплением положительного заряда. Однако при смене полярности этот положительный заряд компенсируется бомбардирующими мишень электронами.

При использовании переменного напряжения низкой частоты длительности каждого полупериода достаточно для полного восстановления разряда. При этом разряд выглядит как последовательность кратковременных разрядов постоянного напряжения с чередующейся полярностью. При повышении частоты (в диапазоне от 50 кГц до нескольких мегагерц) характер разряда меняется.

Из-за малой длительности полупериода высокочастотного напряжения и большого различия в подвижности электронов и ионов до соответствующих электродов успевает дойти большое число электронов и существенно меньше ионов. В силу этого плазма заряжается положительно относительно электродов и возникающая разность потенциалов оказывается достаточной для бомбардировки и распыления.

Использование высокой частоты позволяет получить разряд при более низких давлениях газа в рабочей камере. Это обусловлено тем, что, помимо вторичной эмиссии электронов из электродов, возникает генерация дополнительных электронов. Генерация связана с тем, что электроны, колеблющиеся в поле высокой частоты, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов газа.

Из-за высокой подвижности электронов часть периода, когда действует положительное напряжение, можно установить значительно меньшей, чем время действия отрицательного напряжения. Это позволяет увеличивать ионный ток и, следовательно, скорость распыления, не нарушая условия компенсации положительного заряда. По этой же причине создают установки для распыления с одновременным действием постоянного и ВЧ-напряжения.

Реактивное ионно-плазменное напыление. Особенностью реактивного напыления является возможность образования различных соединений материала мише-

ни и активного газа в зависимости от условий напыления, и, в силу этого, сложность воспроизведения заданного состава диэлектрической пленки. Например, при напылении тантала в кислородной плазме могут образоваться и TaO и TaO_2 ; при напылении кремния — SiO и SiO_2 . Получение пленки того или иного состава сложным образом зависит от содержания активного газа, энергии бомбардирующих ионов, расстояния между мишенью и подложкой, температуры подложки и других факторов. Для выяснения этих зависимостей немаловажное значение имеет установление той области напылительной системы, в которой происходит химическая реакция. Образование химического соединения может происходить на поверхности катода с последующим его распределением, непосредственно на подложке и в газовой среде.

В технологии микросхем особо важное значение имеет получение пленок двуокиси кремния и пленок нитрида кремния. Установлено, что при реактивном напылении двуокиси кремния целесообразно использовать в качестве рабочего газа не чистый кислород, а смесь аргона и кислорода, причем содержание последнего может составлять всего 1...2%. При этом происходит увеличение скорости напыления при полном окислении напыляемой пленки. При получении нитрида кремния в отличие от SiO_2 увеличение производят в плазме чистого азота. При этом необходимы низкие давления рабочего газа, следовательно, использование трехэлектродных систем, либо высокочастотного напыления нецелесообразно.

Основные особенности и преимущества ионно-плазменного напыления. Системы, аналогичные рассмотренным, могут использоваться не только для получения тонких пленок на подложках, но и для ионного травления материалов, которое в последнее время стало находить широкое применение в производстве микросхем. При этом подложки, подлежащие травлению, используются в качестве катода. Металлы можно травить при постоянном напряжении, а диэлектрики при высокочастотном.

Упрощается процесс очистки подложки, которая может быть произведена непосредственно в установке ионной бомбардировкой.

Распылению подвергается только тот материал, который может быть получен в виде пластины. Это ограничение определяет вместе с тем и одно из преимуществ ионного напыления — однородность толщины пленки на подложках больших размеров.

Преимущество метода заключается в разнообразии материалов получаемых пленок — диэлектрики, металлы, в том числе тугоплавкие, многокомпонентные соединения. Высокие энергии распыленных атомов способствует улучшению адгезии пленок к подложкам.

Для процесса ионно-плазменного напыления характерны невысокие скорости осаждения пленок (обычно менее $5 \cdot 10^3$ мкм/с). При этом для повышения скоростей напыления необходимо охла-

ждение мишеней. Без эффективного отвода тепла может происходить нежелательное повышение температуры во всей напылительной системе.

6.5. ОСАЖДЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ИЗ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Данный метод объединяет ряд различных способов получения тонких пленок, в основе которых лежит использование химических реакций, протекающих при повышенных температурах при атмосферном или пониженном давлении. Обычно реагенты поступают в реакционную камеру в виде парогазовых смесей. Для создания пониженного давления парогазовая смесь, поступающая с одного конца реакционной камеры, откачивается с другого. Различные конструкции реакционных камер отличаются друг от друга способом нагрева подложек, уровнем давления в камере (от атмосферного до 7 Па), применением газового разряда. В последнем случае метод осаждения называется плазмохимическим осаждением. На рис. 6.13 — два типа реакционных камер: реактор с пониженным давлением и реактор для плазмохимического осаждения. В табл. 6.4 представлены основные химические реакции для получения наиболее широко используемых пленок в технологии микросхем.

В процессе осаждения пленок может осуществляться их легирование. В качестве источников используются гидриды — фосфин, арсин, диборан.

6.6. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

Методы определения толщины пленок весьма разнообразны. Гравиметрические методы (микровзвешивание, метод кварцевого резонатора) основаны на измерении массе тонкопленочных покры-

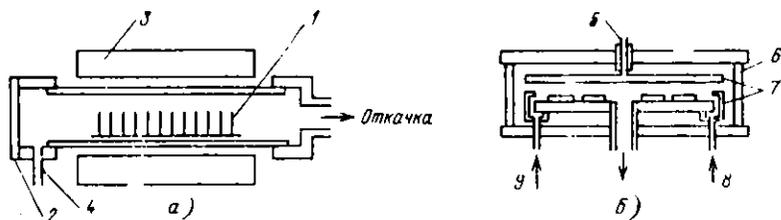


Рис. 6.13. Осаждение тонких пленок из парогазовых смесей в реакторе с пониженным давлением (а) и в реакторе для плазмохимического осаждения (б): 1 — подложки; 2 — плита для ввода подложек; 3 — печь; 4 — вход парогазовой смеси; 5 — изолированный ввод ВЧ напряжения; 6 — цилиндры; 7 — электроды; 8, 9 — входы парогазовой смеси

тий, по которым затем рассчитываются толщины. Оптические методы основаны на интерференции, поскольку толщины пленок по порядку величины близки к длинам волн оптического излучения. Из других оптических методов используется эллипсометрия. Используются также электрические методы.

Свойства тонких пленок очень чувствительны к технологии их нанесения. Пленки одинаковой толщины в зависимости от условий их получения могут иметь различные удельные сопротивления,

Таблица 6.4. Химические реакции при осаждении пленок из парогазовых смесей

| Материал получаемой пленки | Химические реакции |
|--------------------------------------|--|
| SiO ₂ | Разложение тетраэтоксисилана (тетраэтилортогосиликат — ТЭОС) в камерах с пониженным давлением $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 \xrightarrow{650 \dots 750^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 + X$ X — сложная смесь органических и кремнийорганических соединений |
| SiO ₂ | Реакция окисления моносилана (в камерах с атмосферным или пониженным давлением) $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \xrightarrow{400 \dots 450^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$ |
| Si ₃ N ₄ | Реакция моносилана с аммиаком (в камерах с атмосферным давлением) $3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \xrightarrow{700 \dots 900^\circ\text{C}} \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$ |
| Si ₃ N ₄ | Реакция дихлорсилана с аммиаком (в камерах с пониженным давлением) $3\text{SiCl}_2\text{H}_2 + 4\text{NH}_3 \xrightarrow{700 \dots 800^\circ\text{C}} \text{Si}_3\text{N}_4 + 6\text{HCl} + 6\text{H}_2$ |
| SiO ₂ плазмохимический | Реакция силана с закисью азота в аргоновой плазме $\text{SiH}_4 + 4\text{N}_2\text{O} \xrightarrow{200 \dots 350^\circ\text{C}} \text{SiO}_2 + 4\text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ |
| SiNH плазмохимический | Реакция моносилана с аммиаком в аргоновой плазме $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \xrightarrow{200 \dots 350^\circ\text{C}} \text{SiNH} + 3\text{H}_2$ |
| SiNH плазмохимический | Реакция моносилана с азотом в азотной плазме $2\text{SiH}_4 + \text{N}_2 \xrightarrow{250 \dots 350^\circ\text{C}} 2\text{SiNH} + 3\text{H}_2$ |
| Поликремний | Пролитическое разложение моносилана $\text{SiH}_4 \xrightarrow{600 \dots 650^\circ\text{C}} \text{Si} + 2\text{H}_2$ |

температурные коэффициенты сопротивления, диэлектрические потери, коэффициенты поглощения света и т. п. Поэтому в технологии интегральных микросхем часто более важно не измерение толщины пленки после ее получения, а возможность управлять толщиной в процессе нанесения.

Метод кварцевого вибратора. Метод основан на измерении отклонения резонансной частоты пьезоэлектрического кварцевого вибратора, обусловленного изменением массы кварцевой пластины при напылении на нее тонкой пленки. Пьезоэлектрические свойства пластины кварца, в первую очередь, определяются кристаллографической ориентацией срезов по отношению к главным осям монокристалла. В данном случае срез должен обеспечивать возбуждение сдвиговых колебаний по толщине пластины и иметь по возможности более низкий температурный коэффициент частоты. Обычно используют кварцевый кристалл с АТ-срезом. Его резонансная частота определяется соотношением

$$f_0 = \frac{n}{2h} \left(\frac{C}{\rho} \right)^{1/2},$$

где C , ρ и h — соответственно модуль упругости, плотность и толщина кварцевой пластины; n — целое число. При напылении на поверхность кварцевой пластины тонкой пленки толщина кварцевой пластины изменяется на Δh , что вызывает изменение резонансной частоты на Δf . В предположении, что существенного изменения модуля упругости и плотности не происходит, $\Delta f/f_0 = \Delta h/h$. Если площадь кварцевого кристалла A , масса m , а плотность материала наносимой пленки $\rho_{пл}$, то

$$\Delta h = \frac{m}{\rho_{пл} A} \cdot \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Поскольку все параметры, входящие в данное соотношение кроме Δf практически постоянны, то основная задача состоит в измерении отклонений резонансной частоты Δf . Эти отклонения составляют единицы герц, тогда как резонансная частота лежит в пределах единиц мегагерц. Поэтому для измерения Δf используется дифференциальный метод.

Резистивный и емкостный методы. Эти методы контроля толщины пленок основаны на измерении либо сопротивления (для пленок проводящих материалов), либо емкости (для пленок диэлектрических материалов). Поскольку измерять эти параметры можно непосредственно в технологическом процессе, то системы, основанные на этих методах, как и метод кварцевого вибратора, можно отнести к системам управляемого нанесения тонких пленок.

Для измерения электрического сопротивления в установке для нанесения пленки помещается рядом с рабочей подложкой специальная контрольная непроводящая подложка в виде квадратной пластины, на края которой заранее нанесены проводящие контакты. Эта контрольная пластина включается в одно из плеч мостовой схемы. Детектируя разбаланс схемы (по мере роста толщины пленки и снижения ее сопротивления) можно приостановить процесс нанесения пленки (например, с помощью заслонки прекратить доступ наносимого материала к поверхности подложки).

При этом толщина пленки может быть вычислена по формуле

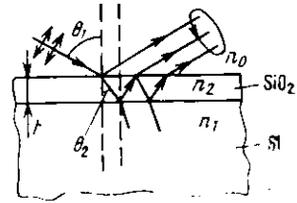
$$h = \frac{\rho}{R_s} = \frac{a\rho}{bR},$$

где ρ — удельное сопротивление наносимого материала; R_s — поверхностное сопротивление слоя пленки; a и b — длина и ширина пленки, R — сопротивление контрольного резистора.

Недостаток метода состоит в отсутствии точных данных об удельном сопротивлении пленок, существенно отличающемся от удельного сопротивления объемного образца и имеющем значительный разброс в зависимости от технологии нанесения. Поэтому системы с таким методом контроля целесообразно использовать в тех случаях, когда наиболее важное значение имеет не толщина пленки, а сопротивление R_s . К таким случаям относятся, например, изготовление резисторов в тонкопленочных интегральных микросхемах.

При емкостном методе измерения толщины диэлектрических пленок также используется специальная контрольная подложка из диэлектрического материала, расположенная рядом с рабочей подложкой. На контрольной подложке изготовлен конденсатор, емкость которого изменяется при нанесении на его поверхность тонкой диэлектрической пленки. Обкладки конденсатора представляют собой гребенчатые структуры, сформированные на узких полосках проводящего материала. При нанесении диэлектрической пленки и заполнении ею каналов между обкладками емкость конденсатора возрастает вследствие увеличения диэлектрической проницаемости. Емкость изменяется в зависимости от толщины наносимой пленки от десятых долей до единиц процентов от ее начального значения. Толщина пленки определяется этим приращением емкости как $\Delta C/K$. Здесь K — постоянная, зависящая от диэлектрической проницаемости и конструктивных параметров контрольного конденсатора. Она определяется при калибровке всего измерительного устройства для каждого вида наносимого диэлектрика. Контрольный конденсатор включается в мостовую схему, которая первоначально находится в состоянии равновесия. Сначала осуществляется разбаланс моста изменением емкости эталонного кон-

Рис. 6.14. Ход лучей линейно поляризованного света при отражении от поверхности подложки, покрытой пленкой SiO₂



денсатора. Это изменение равно приращению емкости контрольного конденсатора при нанесении на него диэлектрической пленки заданной толщины. По мере увеличения толщины наносимой пленки мостовая схема возвращается к состоянию равновесия. Фиксируя равновесие можно автоматически прекращать процесс нанесения пленки.

Метод эллипсометрии. Метод основан на оценке изменения поляризации света, отраженного от подложки с тонкой прозрачной пленкой на поверхности. При освещении подложки линейно поляризованным светом составляющие излучения — параллельная ρ_p и перпендикулярная ρ_s плоскости падения — отражаются по-разному. В результате этого после отражения излучение оказывается эллиптически поляризованным. Измерив эллиптичность отраженной волны, можно определить свойства пленки, вызвавшей изменение поляризации.

Результирующие амплитуды всех пучков света, отраженных от грани раздела пленка — воздух и подложка — пленка (рис. 6.14) для параллельной и перпендикулярной составляющих излучения равны соответственно

$$R_p = \rho_p \exp(i \Delta_p) = \frac{r_{12p} + r_{23p} \exp(-2i \delta)}{1 + r_{12p} r_{23p} \exp(-2i \delta)}$$

$$R_s = \rho_s \exp(i \Delta_s) = \frac{r_{12s} + r_{23s} \exp(-2i \delta)}{1 + r_{12s} r_{23s} \exp(-2i \delta)}$$

где Δ_p и Δ_s — фазы параллельной и перпендикулярной составляющих излучения; r_{12p} , r_{12s} , r_{23p} и r_{23s} — коэффициенты отражения Френеля от пленки и подложки, определяемые показателями преломления и углом падения излучения θ_1 ; δ — изменения фазы, вызванное прохождением луча света через пленку толщиной h , равное

$$\delta = \frac{360h}{\lambda} (n_2^2 - \sin^2 \theta_1)^{1/2}$$

где λ — длина волны, n — показатель преломления пленки.

Состояние поляризации характеризуется отношением $\lg \Psi \rho_p / \rho_s$ и разностью фаз $\Lambda = \Delta_p - \Delta_s$. Основное уравнение эллипсометрии имеет вид

$$\lg \Psi \exp(i \Delta) = \frac{\rho_p}{\rho_s} \exp[i(\Delta_p - \Delta_s)]$$

Из этого уравнения, зная оптические параметры подложки и экспериментально определив значения $\text{tg } \Psi$ и Δ , можно найти показатель преломления и толщину пленки h .

Для кремния комплексный коэффициент преломления при $\lambda = 0,5461$ мкм равен $n_1 = 4,050 - 0,028i$. Для данного значения показателя преломления и угла падения $\theta_1 = 70^\circ$ с использованием ЭВМ решено уравнение эллипсометрии. Полученная теоретическая зависимость Ψ и Δ от показателя преломления пленки и ее толщины представлена на рис. 6.15. Цифры у кривых соответствуют различным показателям преломления пленки n_2 . Толщина пленки определяется по приращению δ , которое изменяется вдоль каждой кривой от 0 до 180° (интервалы указаны черточками). Стрелки кривых показывают направление увеличения толщины пленки. Поскольку Ψ и Δ являются периодическими функциями толщины (их значения повторяются примерно через 0,24 мкм), то для установления порядка толщины пленки нужно использовать другие методы измерения.

Графики, представленные на рис. 6.15, позволяют после экспериментального установления значений Ψ и Δ из эллипсометрических измерений определить показатель преломления и толщину исследуемой пленки, нанесенной на поверхность кремния.

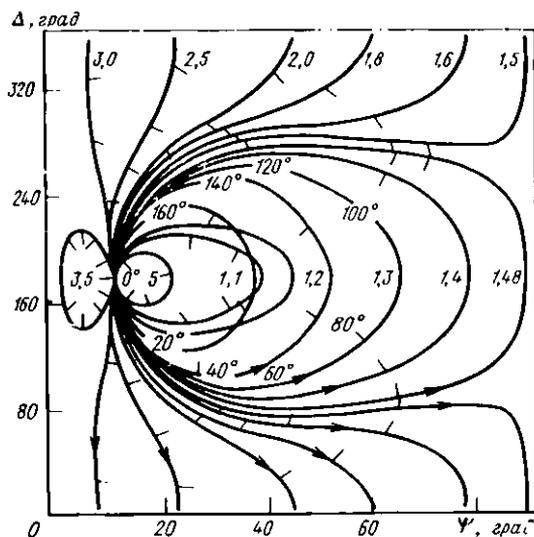
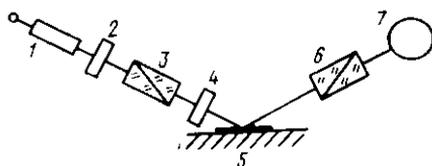


Рис. 6.15. Зависимость Ψ и Δ от показателя преломления и толщины прозрачных пленок на кремнии

Рис. 6.16. Схема эллипсометра:

1 — источник света; 2, 4 — четвертьволновая пластинка-компенсатор; 3 — поляризатор; 5 — подложка; 6 — анализатор; 7 — фотоприемник



Эллипсометр (рис. 6.16) представляет собой установку, позволяющую поляризовать монохроматический свет под определенным углом относительно плоскости падения и направлять его под углом к поверхности подложки с исследуемой пленкой, а также измерять эллиптичность поляризованного света и ориентацию его главных осей относительно плоскости падения.

Он содержит источник монохроматического света. Поляризатор и анализатор можно вращать, точно фиксируя углы вращения. Быстрая ось четвертьволновой фазовой пластинки (компенсатора) установлена под углом 45° к плоскости падения света. Детектором отраженного излучения может служить фотодиод. Вращением поляризатора добиваются такой эллиптичности света на выходе компенсатора, что свет, отраженный от исследуемой пленки, становится линейно поляризованным. Это значит, что суммарный сдвиг фазы в результате действия компенсатора и отражения от пленки и подложки равен 0° или 180° . Ориентация линейно поляризованной волны измеряется с помощью анализатора. Положения поляризатора и анализатора, соответствующие минимальному сигналу детектора, фиксируются, и по ним рассчитываются значения Ψ и Δ .

Цветовой метод определения толщины пленок SiO_2 . Для определения толщины пленок SiO_2 используют известную способность тонких прозрачных пленок, нанесенных на отражающую подложку изменять свой цвет в зависимости от толщины. Метод получил название цветowego. В основе цветowego метода лежит явление интерференции световых лучей, отраженных от границы раздела пленка — воздух и пленка — подложка. Оптическая разность хода этих лучей равна $2nh/\cos\theta$, где h — толщина пленки; θ — угол преломления лучей в пленке; n — показатель преломления пленки. Для нормального падающего света с длиной волны λ условиями интерференции с усилением и ослаблением являются соответственно соотношения $2h = \kappa\lambda/n$ и $2h = (2\kappa - 1)\lambda/2n$ (κ — целое число).

При освещении пластины кремния с поверхностной пленкой SiO_2 равномерным нормально падающим белым светом цвет пленки создается той частью спектра излучения, которая не ослабляется при интерференции. При изменении h эта часть спектра изменяется, что влечет за собой изменение цвета. Естественно, что

при косом освещении цвет пленки будет изменяться и зависеть от угла преломления θ .

Таблица 6.5 показывает изменение цвета термически выращенных пленок SiO_2 при возрастании их толщины.

Таблица 6.5. Зависимость цвета термически выращенной пленки двуокиси кремния от ее толщины

| Порядок интерференции | Толщина пленки, мкм | Цвет пленки SiO_2 | Порядок интерференции | Толщина пленки, мкм | Цвет пленки SiO_2 | | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|------------|-----------------------|---------|--------------------|---------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0,05 | Бежевый | 3 | 0,44 | Фиолетово-красный | | | | | | | | |
| | 0,07 | Коричневый | | 3 | 0,46 | Красно-фиолетовый | | | | | | | |
| | 0,10 | Темно-фиолетовый | | | 3 | 0,47 | Фиолетовый | | | | | | |
| | 0,12 | Голубой | | | | 3 | 0,48 | Голубовато-фиолетовый | | | | | |
| | 0,15 | Светло-голубой | | | | | 3 | 0,49 | Голубой | | | | |
| | 0,17 | Металлический | | | | | | 3 | 0,50 | Голубовато-зеленый | | | |
| | 0,20 | Светло-золотистый | | | | | | | 3 | 0,52 | Зеленый | | |
| | 0,22 | Золотистый | | | | | | | | 3 | 0,54 | Темновато-зеленый | |
| | 0,25 | Оранжевый | | | | | | | | | 3 | 0,56 | Зеленовато-желтый |
| | 0,27 | Красно-фиолетовый | | | | | | | | | | 3 | 0,57 |
| 2 | 0,30 | Фиолетово-голубой | 4 | | | | | | | | | | 0,58 |
| | 0,31 | Голубой | | 4 | | | | | | | | | 0,60 |
| | 0,32 | Зелено-голубой | | | 4 | | | | | | | | 0,63 |
| | 0,34 | Светло-зеленый | | | | 4 | | | | | | | 0,68 |
| | 0,35 | Зеленый | | | | | 4 | | | | | | 0,72 |
| | 0,36 | Темно-зеленый | | | | | | 4 | | | | | 0,77 |
| | 0,37 | Зеленовато-желтый | | | | | | | 4 | | | | 0,80 |
| | 0,39 | Желтый | | | | | | | | 4 | | | 0,83 |
| | 0,41 | Светло-оранжевый | | | | | | | | | 4 | | 0,85 |
| | 0,42 | Телесно-розовый | | | | | | | | | | 4 | |

Цветовой метод может быть отнесен к неразрушающим методам контроля толщины, если толщина пленки приблизительно известна (с точностью примерно $\pm 0,075 \dots 0,1$ мкм). При известных технологических режимах выращивания пленки это требование обычно выполняется. Если данные о возможной толщине отсутствуют, то на пленке химическим травлением (обычно в плавиковой кислоте) создается клин травления. При этом образующаяся при освещении цветовая картина представляет собою серию цветных полос, от соответствующей максимальной толщине до цвета неокисленного кремния, что позволяет установить порядок интерференции.

6.7. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЕ И ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Разработки и внедрение в технологию литографии процессов ионного травления направлены на преодоление тех недостатков, которые свойственны жидкостному травлению. К ним относятся: во-первых, отклонение размеров окон в пленке двуокиси кремния и металлических дорожек межэлементных соединений от размеров рисунка в фоторезистивной маске (в результате бокового подтравливания под слоем фоторезиста увеличиваются размеры элементов интегральных микросхем и снижение ширины дорожек соединений); во-вторых, неконтролируемое загрязнение поверхности пластины кремния из-за недостаточной очистки от примесей жидкостных травителей; в-третьих, трудоемкость операций химического травления и определенная сложность автоматизации этого процесса.

Ионно-плазменный метод травления. Разрушение мишени (катода) бомбардировкой ионов в плазме тлеющего разряда, используемое для нанесения тонких пленок, может иметь и самостоятельное значение. Если в качестве мишени используется кремниевая пластина с нанесенными на ее поверхность тонкими пленками, которые необходимо локально удалить, то процесс разрушения поверхности мишени называют ионно-плазменным травлением. При этом в качестве защитной маски может использоваться материал с существенно более низкой (по сравнению с пленкой) скоростью травления.

Закономерности процесса разрушения (травления) мишени были рассмотрены в § 6.4 данной главы, где были установлены основные факторы, влияющие на скорость удаления материала мишени, а именно энергия бомбардирующих ионов, коэффициент распыления, давление газа в рабочей камере, концентрация остаточных газов, угол падения ионов на поверхность мишени. Однако в процессах литографии всегда используется локальное травление, и без установления особенностей локального ионно-плазменного травления нельзя правильно выбрать материалы для создания маски и режимы травления.

Поток ионов может быть с достаточно высокой точностью направлен нормально к обрабатываемой поверхности пленки при этом боковое подтравливание существенно ослабляется. Однако существуют факторы, нарушающие условие нормального падения ионов к обрабатываемой поверхности. И без подавления действия этих факторов невозможно устранить боковой уход размеров элементов. Один из них состоит в том, что боковые стенки защит-

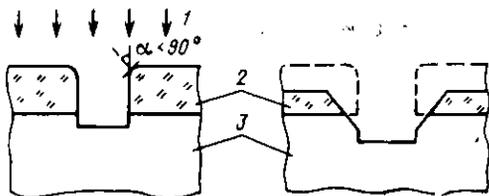


Рис. 6.17. Форма и размеры рисунка на начальной и более поздних стадиях травления:

1 — поток ионов; 2 — маска; 3 — подложка

ной маски не вертикальны по всей глубине рельефа. Верхние углы маски имеют некоторое закругление, в силу чего на этих участках углы падения ионов (отсчет ведется от нормали к поверхности) снижаются, а скорость травления увеличивается. Поэтому первоначальные незначительные закругления на углах маски приводит к резко выраженному изменению профиля ее боковых стенок (рис. 6.17) и в результате к изменению формы и размеров получаемых при травлении рисунков. Чтобы снизить боковой уход размеров, необходимо выбирать для маски материалы с низкими коэффициентами распыления. Тогда влияние изменения углов падения ионов будет снижено.

При отклонении боковых стенок маски от вертикали наблюдается еще один эффект, влияющий на форму и размеры рисунка. Это — отражение ионов от боковых стенок маски. При больших углах падения те ионы, которые отразились от боковой поверхности, увеличивают поток бомбардирующих ионов на некотором расстоянии δ от края маски (рис. 6.18). В результате вблизи края маски травление пленки происходит на большую глубину по сравнению с центральной областью окна. При наличии на подложке многослойной пленки это может вызвать протравливание нескольких слоев и привести к браку пластины, например, к коротким замыканиям при многоуровневой разводке межэлементных соединений.

Влияние эффекта отражения можно уменьшить, изменяя угол падения ионов на боковые стенки. Для этого необходимо при разработке реакционной камеры предусматривать возможность вращения держателя обрабатываемых пластины относительно направления ионного пучка. Кроме того, выбор условий экспонирования и проявления в процессе создания маски должен происходить с учетом необходимости получения вертикальных стенок маски.

Влияет на форму рисунков и переосаждение распыляемого материала, так как поверхность травления одновременно принимает атомы, распыляемые с других участков вытравливаемой пленки. Скорость травления определяется соотношением количества материала, удаляемого с поверхности и принимаемого ею с других участков. Существенное снижение скорости травления из-за пере-

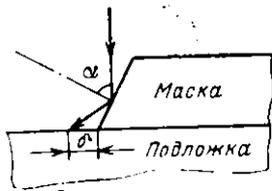


Рис. 6.18. Поток бомбардирующих ионов, возникающих из-за отражения от боковой стенки маски

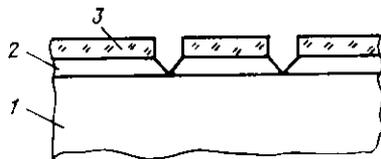


Рис. 6.19. Замыкание металлических дорожек вследствие V-образной формы вытравленных областей:
1 — подложка; 2 — металлическая разводка; 3 — маска

осаждения происходит при вытравливании узких канавок. При этом они приобретают V-образную форму, в результате чего возможны короткие замыкания между соседними дорожками соединений (рис. (рис. 6.19).

Учитывая рассмотренные факторы, можно сформулировать требования к маскам при использовании ионного травления. Они состоят в следующем:

отношение скоростей травления материалов маски и пленки должно быть минимальным;

материал маски должен иметь слабую зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов;

для ослабления эффекта пересаживания стравливаемого материала и снижения размеров элементов интегральных микросхем толщина маски должна быть минимально возможной при сохранении ее защитных свойств:

угол наклона боковых стенок маски должен быть близок к 90° ;

материал маски должен быть термостойким, поскольку при повышении плотности ионного тока происходит интенсивный разогрев подложки (мишени), подвергающейся травлению.

При ионном травлении используют маски трех типов: фоторезистивные, металлические и графитовые.

Скорости травления фоторезистивных масок ($0,4 \dots 0,85$ нм/с) близки к скоростям травления Si ($0,49$ нм/с) и SiO_2 ($0,44$ нм/с). Поэтому при использовании этих масок глубина травления не должна превышать толщину маски. Для более точного воспроизведения размеров и формы рисунков следует допускать только частичное протравливание маски, поэтому глубина травления не должна превышать примерно четверти толщины маски. Толщина фоторезистивных масок обычно лежит в диапазоне $0,5 \dots 1,5$ мкм. Повышение стойкости фоторезистивных масок к ионному травлению достигается некоторой модификацией обычного, применяемого в фотолитографии, процесса задубливания фоторезиста. Модифика-

ция состоит в использовании термообработки в среде азота или инертных газов, а не воздуха, а также в оптимизации температуры задубливания по стойкости к ионному травлению.

К недостатку фоторезистивных масок относят резкое увеличение скорости их травления от давления остаточных химически активных газов (водорода, кислорода, паров воды) в реакционной камере. Определенные трудности при использовании таких масок возникают в силу их недостаточной термостойкости. Кроме того, в структуре фоторезистов при ионной бомбардировке происходят изменения, аналогичные происходящим в процессе экспонирования. При этом фоторезисты становятся трудно растворимыми в химических реактивах, обычно используемых для их удаления.

Металлические маски получают из пленок Pt , Cr , V , Mo , Ta , используя либо обычную фотолитографию с жидкостными химическими реагентами, либо фотолитографию с ионным травлением через фоторезистивные маски.

На скорость травления металлических масок также сильно влияет содержание в реакционной камере химически активных газов, в частности кислорода. Но для металлических масок, в отличие от фоторезистивных, скорость травления резко падает. Поскольку присутствие активных газов на скорость травления таких материалов, как Si , SiO_2 , Si_3N_4 влияет незначительно, то металлические маски можно использовать для проведения глубокого ионного травления этих материалов. Положительным свойством металлических масок является их высокая термостойкость, что позволяет повысить плотность ионного тока, увеличивать скорость травления.

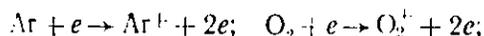
Удаление металлических масок проводится либо в жидких химических травителях, либо ионным травлением. В последнем случае при расчете времени травления подложки необходимо учитывать время, требуемое для удаления маски.

Графитовые маски используют для глубокого травления таких подложек и пленок, у которых скорости травления сравнимы со скоростями травления металлических масок.

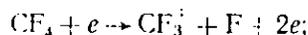
Плазмохимический метод травления. Этот метод состоит в том, что разрушение обрабатываемого материала происходит благодаря химическим реакциям между ионами активного газа или другими активными частицами, образующимися в плазме газового разряда, и атомами этого материала. При этом в результате химических реакций образуются летучие соединения. При плазменном травлении в качестве рабочих используются галогеносодержащие газы. Их выбор обусловлен тем, что именно в галогеносодержащей плазме появляются элементы, реагирующие с применяемыми в микросхемах материалами и образующие легколетучие соединения. Особенность травления в газовом разряде — наличие электронов, возникновение и потеря которых определяет рав-

повешное состояние в разряде. Ионизация молекул рабочего газа может осуществляться наряду с диссоциацией молекул. Ниже приведены возможные типы реакций, протекающих в плазме:

1) простая ионизация



2) ионизация с диссоциацией молекул



3) ионизация с диссоциацией молекул и адсорбцией;

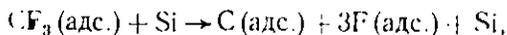


В качестве примера рассматривается травление Si, которое происходит в соответствии с реакциями:

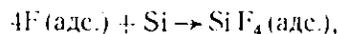
1) адсорбция CF_3^+ на поверхности Si



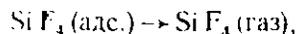
2) хемосорбция с диссоциацией CF_3 :



3) химическое взаимодействие



4) десорбция молекул продуктов реакции



5) удаление углерода

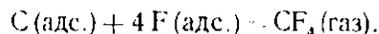


Схема установки для плазменного травления представлена на рис. 6.20. Давление в рабочей камере чаще всего варьируется от 13,3 до 1330 Па, частота подаваемого напряжения составляет несколько мегагерц. При работе на установке следует учитывать, что в результате химических реакций образуются отравляющие вещества. В табл. 6.6 указаны рабочие газы, используемые при плазменном травлении основных пленок в производстве микросхем, и

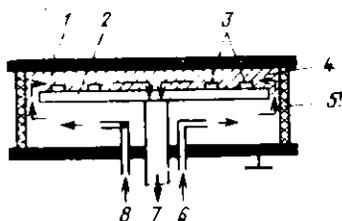


Рис. 6.20. Схема установки для плазменного химического травления:

1 - вход ВЧ напряжения; 2 - нижний электрод-держатель; 3 - подложка; 4 - плазма; 5 - цилиндр из диэлектрического материала; 6, 7 - рабочие газы; 8 - к массовому потоку.

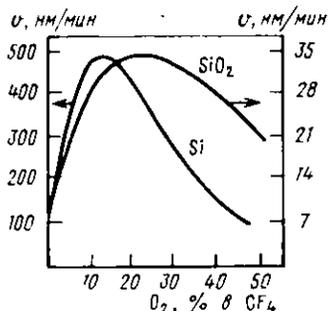


Рис. 6.21. Зависимость скорости травления Si и SiO₂ от содержания H₂ в плазме CF₄.

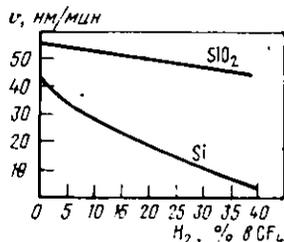


Рис. 6.22. Зависимость скорости травления Si и SiO₂ от содержания O₂ в плазме CF₄.

соответствующие им скорости травления. На рис. 6.21 и 6.22 показано влияние концентрации H₂ и O₂ в плазме CF₄ на скорость травления.

На разных этапах изготовления микросхем приходится либо травить пленки, не нарушая подложки, либо травить один из слоев многослойной пленки, не нарушая других. В этих условиях важна селективность травления пленок, которая характеризуется отношением скоростей травления различных материалов. Например, селективность травления Si по отношению к SiO₂ определяется отношением v_{Si}/v_{SiO_2} . Данные табл. 6.6 и рис. 6.21 и 6.22 дают представление о селективности травления ряда пленок при плазмохимическом травлении.

Таблица 6.6. Скорости плазмохимического травления*

| Газовая среда | Скорость травления | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------------------------|------------------------|-----|------------------------|
| | SiO ₂ | Si ₃ N ₄ | Si поликристаллический | Al | Si монокристаллический |
| CF ₄ | 100 | 120 | — | — | 20 |
| CF ₄ +O ₂ (20%) | 35 | — | 450 | — | — |
| CF ₄ +H ₂ (20%) | 50 | — | — | — | 20 |
| CCl ₄ | 22 | — | — | 500 | 100 |
| Cl ₂ | 2...2,6 | — | 50...80 | — | — |

* Скорости травления могут отличаться от представленных при изменении режимов травления (ВЧ-напряжения, давления, скорости потока газа).

В технологии фотолитографии широкое распространение получил плазмохимический метод удаления фоторезистов. Этот метод используется и в тех случаях, когда применяются обычные методы

жидкостного травления через фоторезистивные маски, и в сочетании с методами ионно-плазменного травления. В качестве активного газа для удаления фоторезисторов обычно используют кислород, иногда с небольшими (примерно 1%) добавками водорода или азота.

Активными частицами, вступающими в химическую реакцию с фоторезистом, являются атомарный кислород и озон, которые возникают благодаря диссоциации молекул кислорода в плазме газового разряда. Концентрация атомарного кислорода в такой плазме оценивается величиной 10 ... 20%. Наблюдаемое увеличение скорости удаления фоторезиста при добавлении водорода и азота объясняют их каталитическим действием в тех химических превращениях, которые приводят к появлению атомарного кислорода.

Кислород вводится в реакционно-разрядную камеру со скоростью 100 ... 1000 см³/мин при непрерывной его откачке для поддержания давления на уровне 4 Па.

KOPIE LB

Глава 7. ЛИТОГРАФИЯ

7.1. ВВЕДЕНИЕ

Получение рельефа требуемой конфигурации в диэлектрических полупроводниковых и металлических пленках на поверхности полупроводниковых или диэлектрических подложек — неотъемлемый процесс технологии интегральных микросхем. Этот процесс получил название литографии. Литография основана на использовании особых высокомолекулярных соединений — резистов, обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений; ультрафиолетового (УФ) — фотолитография; рентгеновского — рентгенолитография; потока электронов — электролитография; потока ионов — ионная литография.

Возможности фотолитографии ограничены длиной волны излучения, к которому чувствительны разработанные фоторезисты, поскольку в результате дифракции света происходит расширение получаемого окна. В реальных процессах серийного производства контактная фотолитография позволяет получать в слое фоторезиста минимальный размер до 0,8 мкм, проекционная фотолитография до 0,4 мкм.

С учетом особенностей жидкостного химического травления

этот размер в рабочих пленках увеличивается до 2 ... 3 мкм. Использование ионно-плазменных и плазмохимических методов обработки позволяет получить размеры рисунка в рабочих пленках, близкими к размерам в слое фоторезиста. Однако и в этом случае получение субмикронных размеров возможно лишь на пределе разрешающей способности метода фотолитографии, что безусловно снижает точность воспроизведения размеров рисунков.

Поскольку минимальный размер элементов интегральных микросхем определяет плотность упаковки, надежность, стоимость и такие важные параметры, как быстродействие и потребляемая мощность, то получение субмикронных размеров элементов является одной из основных задач технологии больших и сверхбольших интегральных схем.

С уменьшением длины волны дифракционное рассеяние уменьшается. Поэтому перспективны коротковолновая фотолитография, рентгенолитография и электролитография.

7.2. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Суть процесса фотолитографии состоит в следующем. Чувствительные к свету фоторезисты наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (экспонированию). Использование специальной стеклянной маски с прозрачными и непрозрачными полями (фотошаблона) приводит к локальному воздействию излучения на фоторезист и, следовательно, к локальному изменению его свойств. При последующем воздействии определенных химикатов происходит удаление с подложки отдельных участков пленки фоторезиста, освещенных или неосвещенных в зависимости от типа фоторезиста (проявление). Таким образом, из пленки фоторезиста создается защитная маска с рисунком, повторяющим рисунок фотошаблона. Ниже подробно рассматриваются основные технологические операции, составляющие процесс фотолитографии.

Фоторезисты. В зависимости от механизма фотохимических процессов, протекающих под действием излучения, растворимость экспонированных участков фоторезиста может либо возрастать, либо падать. В первом случае фоторезисты называют позитивными, во втором — негативными. Пленка позитивного фоторезиста под действием излучения становится неустойчивой и растворяется при проявлении (рис. 7.1,а), пленка негативного фоторезиста, наоборот, под действием излучения становится нерастворимой, в то время как неосвещенные участки при проявлении растворяются (рис. 7.1,б).

Свойства фоторезистов характеризуются рядом параметров. Одним из основных параметров является чувствительность к из-

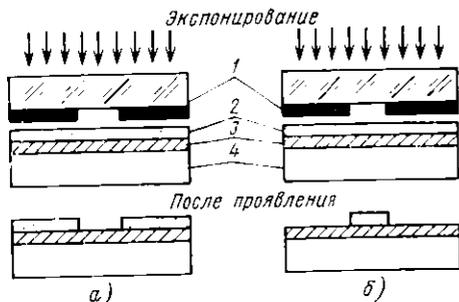


Рис. 7.1. Получение рисунка для позитивного (а) и негативного (б) фоторезистов:

1 - фотошаблон; 2 - фоторезист; 3 - пленка SiO_2 ; 4 - кремний

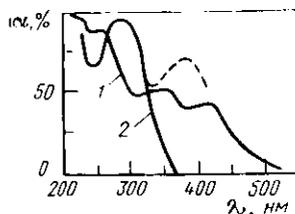


Рис. 7.2. Спектры поглощения фоторезистов:

1 - позитивный; 2 - негативный

лучению. Широкое распространение получили фоторезисты, чувствительные к УФ-излучению. Это негативные фоторезисты на основе поливинилилипиамата, в которых в результате фотохимических реакций происходит сшивание молекул в полимерные структуры, и позитивные фоторезисты на основе нафтохинондиазидов, в которых под действием света происходит разрушение межмолекулярных связей. Спектры поглощения этих фоторезистов представлены на рис. 7.2. Для позитивного резиста спектральная характеристика содержит несколько максимумов поглощения, длинноволновая граница поглощения — около 500 нм. Для негативного резиста — длинноволновая граница — 350 нм. Введением специальных веществ — сенситизаторов — она сдвигается до 400 ... 420 нм (штриховая кривая).

Критерий чувствительности — высокие защитные свойства локальных участков. Для негативных фоторезистов это означает задубливание или полимеризацию в экспонированных участках на глубину, достаточную для защиты от воздействия травителей. Экспериментально найдено, что с увеличением экспозиции H (энергии излучения на единицу площади) растет толщина слоя h_s , в котором произошло сшивание молекул. Зависимость, связывающая толщину этого слоя с экспозицией, называется характеристической кривой (рис. 7.3). Как показали исследования, наилучшее качество рисунка, в частности четкость края, достигается, если h_s близка к полной толщине слоя фоторезиста.

Критерий чувствительности позитивного фоторезиста — полное удаление пленки фоторезиста в экспонированных участках. Полное удаление происходит в том случае, если достигается максимальная скорость проявления. Зависимость скорости проявления от экспозиции (рис. 7.4) называется характеристической кривой для позитивного фоторезиста.

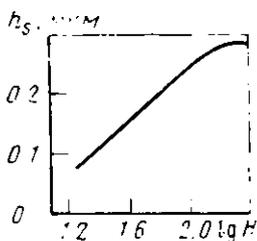


Рис. 7.3. Характеристическая кривая негативного фоторезиста

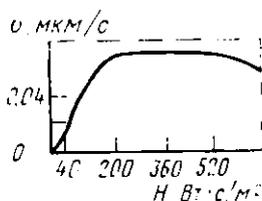


Рис. 7.4. Характеристическая кривая положительного фоторезиста

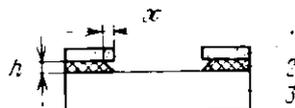


Рис. 7.5. Клин травления на границе рельефа двуокиси кремния — фоторезист

1 — пленка фоторезиста;
2 — пленка SiO_2 ; 3 — кремний

Другой основной параметр — разрешающая способность фоторезиста. Она определяется как число задублинных линий на 1 мм со свободными от резиста промежутками. Разрешающая способность слоя зависит от его толщины и достигает для используемых в настоящее время фоторезистов 2000 линий/мм при толщине 0,2 ... 0,3 мкм. Указанная разрешающая способность фоторезиста обычно не достигается при создании рисунка в пленке SiO_2 . Это обусловлено параметрами источника излучения, методом получения пленки SiO_2 и обработкой ее поверхности, выбором травителя и др. Понятие разрешающей способности, характеризующей для данного фоторезиста фотолитографический процесс в целом, определяется как число линий, выставленных в пленке SiO_2 (толщиной 0,5 ... 1 мкм) на 1 мм и чередующихся с линиями SiO_2 такой же ширины. Эта разрешающая способность достигает 400 ... 500 линий/мм.

Кислотостойкость как параметр определяет стойкость фоторезистов к воздействию агрессивных травителей. Нестойкость проявляется в растравлении пленки SiO_2 на границах рельефа, в результате чего возникает клин — растравленная область с переменной толщиной SiO_2 . Кислотостойкость принято характеризовать отношением толщины пленки двуокиси кремния h к ширине растравленной области x , которое называют обычно «клином травления» (рис. 7.5).

Основные требования к фоторезистам состоят в повышении их чувствительности, разрешающей способности и кислотостойкости. Кроме этих требований выдвигается ряд других, выполнение которых также существенно влияет на качество фотолитографического процесса. Фоторезисты должны обеспечивать получение тонких

(от 0,2 до 3 мкм) и сплошных пленок, достаточно легко наносимых и удаляемых с подложки, обладать высокой адгезией к подложке. Они не должны содержать механических включений (например, частиц пыли). Наиболее широкое применение в производстве кремниевых микросхем нашли позитивные фоторезисты марок ФП-383, ФП-330, ФП-307, ФП-333, ФП-РН-71. Поэтому в дальнейшем технологический процесс фотолитографии будет рассмотрен для позитивных фоторезистов.

Технология фотолитографического процесса. Технологический процесс фотолитографии проводится в следующей последовательности: 1) обработка подложки; 2) нанесение фоторезиста; 3) сушка фоторезиста; 4) совмещение и экспонирование; 5) проявление защитного рельефа; 6) сушка фоторезиста (задубливание); 7) травление подложки; 8) удаление фоторезиста.

Защитный рельеф фоторезиста получают на самых разнообразных пленках. Так, только в планарной технологии микросхем малой степени интеграции фоторезист наносится на пленки пяти материалов, получаемых на кремниевых подложках; двуокиси кремния, боросиликатного стекла, фосфоросиликатного стекла, поликремния, алюминия. В технологии БИС и СБИС, а также тонкопленочных микросхем количество разнообразных материалов возрастает.

Качество защитного рельефа определяется свойствами поверхности пленок. В частности, от свойств поверхности зависит адгезия к ней фоторезиста. Накопленный опыт говорит о том, что адгезия снижается, а боковое растравливание возрастает, если поверхность гидрофильна. Наоборот, гидрофобность устраняет эти негативные явления. Гидрофильность поверхности можно характеризовать углом смачивания поверхности пленки водой (угол, образованный поверхностью пленки и касательной к поверхности капли воды).

В пленках двуокиси кремния, полученных в парах воды или во влажном кислороде, вода может образовывать с поверхностными атомами оксида прочные связи, при этом гидрофильность поверхности пленки возрастает, а угол смачивания уменьшается. Для увеличения угла смачивания целесообразно использовать комбинированный способ получения пленок SiO_2 — в сухом, влажном, а затем вновь в сухом кислороде. При хранении на воздухе, а также после обработки в кислотах и органических растворителях угол смачивания уменьшается, поэтому фоторезист следует наносить сразу после окисления без каких-либо дополнительных обработок поверхности подложки. Если подложки хранятся более часа, то дополнительная термообработка в сухом кислороде или азоте при $T=1000^\circ\text{C}$ в течение нескольких минут позволяет устранить возросшую гидрофильность поверхности.

Пленки боросиликатных и фосфоросиликатных стекол более гидрофильны по сравнению с пленками SiO_2 . Поэтому процесс фотолитографии для этих

пленок более сложен. Это особенно характерно для пленок фосфоросиликатного стекла с высоким содержанием P_2O_5 , получаемых при создании эмиттерной области транзисторов. Здесь для повышения угла смачивания используются инфракрасная сушка и ряд более сложных способов, например обработка в органосиланах.

Для стабилизации адгезии фоторезиста к поверхности пленок алюминия разрабатывают новые методы их получения. Например, при вакуумном напылении пленок алюминия улучшить адгезию к ним фоторезиста можно заметной резистивных испарителей испарителями с электронно-лучевым нагревом. Качество рисунка на пленке алюминия повышается благодаря увеличению скорости травления алюминия, что возможно при более высоких скоростях напыления, характерных для электронно-лучевого нагрева.

Для нанесения фоторезиста на подложку можно использовать следующие способы: 1) центрифугирование; 2) пульверизация; 3) погружение в раствор; 4) полив.

В настоящее время наиболее распространено центрифугирование. Подложка помещается на вращающийся диск, на ее центральную часть наносится фоторезист. Равномерность нанесения фоторезиста в этом случае обеспечивается центробежными силами при быстром вращении центрифуги. Частота вращения составляет сотни и тысячи оборотов в минуту (в зависимости от требуемых толщины и вязкости слоя резиста).

Минимальный размер элемента a_{\min} и толщина слоя фоторезиста h в определенном приближении связаны соотношением $h \leq (0,2 \dots 0,3) a_{\min}$. Это соотношение накладывает ограничение на максимальную толщину слоя. Минимальная толщина определяется плотностью проколов, поскольку с уменьшением толщины плотность проколов возрастает.

Типичное время нанесения фоторезиста составляет 20 ... 40 с при частоте вращения центрифуги соответственно 4000 ... 2000 об./мин.

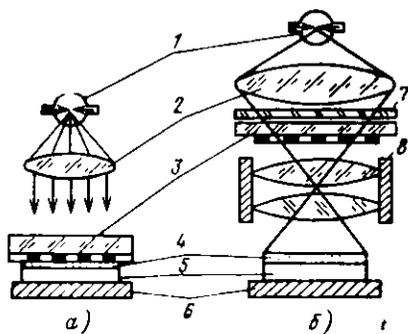
Особенностью других методов нанесения фоторезиста является возможность получения только толстых слоев фоторезиста (приблизительно от 2,5 до 20 мкм).

Первая сушка нанесенного на подложку позитивного фоторезиста проводится для удаления растворителя. Температура сушки не должна превышать 110°C , чтобы исключить разрушение молекул, которое может происходить в результате не только фотохимических, но и термохимических процессов, а время процесса выбирается в зависимости от типа фоторезиста.

Операции совмещения и экспонирование выполняются на специальных установках, конструкции которых определяются способом передачи изображения. В настоящее время нашли практичес-

Рис. 7.6. Схемы контактного (а) и проекционного (б) экспонирования.

1 - источник света; 2 - конденсор; 3 - фотонаблон; 4 - фоторезист; 5 - подложка кремния; 6 - столик; 7 - светофильтр; 8 - проекционный объектив



кое применение два способа передачи изображений: контактное экспонирование и проекционное экспонирование.

Схема контактного экспонирования представлена на рис. 7.6,а. Источник света подбирается по спектральной характеристике и мощности. Достаточно высокую интенсивность излучения в диапазоне 300 ... 450 нм и мощность 100 ... 500 Вт обеспечивают ртутно-кварцевые лампы высокого давления типов ДРШ-100, ДРШ-250, ДРШ-500. Для создания равномерного светового потока с параллельным пучком света используют системы кварцевых конденсоров. Время экспонирования задается специальным устройством — электромагнитным затвором.

Установка содержит устройство совмещения, при помощи которого осуществляется взаимная ориентировка подложки и фотошаблона и плотный контакт между ними. Обычно во время совмещения фотошаблон закрепляется неподвижно, а подложка перемещается.

Для визуального наблюдения и контроля качества совмещения используется микроскоп, к ряду характеристик которого предъявляются определенные требования. К ним относятся увеличение микроскопа, определяющие размер изображения рисунка, и разрешающая способность.

При определении разрешающей способности необходимо учитывать явление дифракции, приводящее к тому, что лучи от точечного объекта не сходятся в точку изображения, а создают дифракционную картину в виде центрального светового пятна, окруженного концентрическими кольцами с убывающей интенсивностью. Диаметр центрального светового пятна равен $2r = 1,22 \lambda / A$. Здесь λ — длина волны излучения; A — апертура объектива, характеризующая площадь поверхности линзы для входа света (диаметр входного отверстия) и определяемая как $A = n \sin \theta$, где n — показатель преломления среды в пространстве изображения (для воздуха $n = 1$), а θ — угол, образуемый нормалью к поверхности линзы в центральной точке и прямой, соединяющей границу входного отверстия с фокусом.

Разрешающая способность определяется как расстояние между двумя точками изображения, при котором максимум дифракционной картины одной точки совпадает с первым минимумом дифракционной картины другой точки. Это расстояние равно $\alpha = 2r/2 = 0,61 \lambda/A$ и определяет наименьший видимый размер элемента.

Микроскоп характеризует и глубиной резкости. Оптимальной называется такая глубина резкости объекта в направлении оптической оси, при которой распределение света изменяется незначительно. Глубина резкости может быть представлена как $T = \lambda/A^2$. Требования к этим характеристикам противоречивы, так как с увеличением апертуры повышается разрешающая способность, но снижается глубина резкости. Например, при необходимости получить на длине волны $\lambda = 0,5$ мкм разрешающую способность 0,7 мкм нужно использовать объектив с апертурой почти 0,43. При этом глубина резкости составляет 2,7 мкм. Подложки кремния в результате механической и термической обработок могут иметь отклонения от плоскопараллельности и кривизну, превышающие указанную глубину резкости, поэтому при использовании объективов с указанными параметрами совмещение практически невозможно. Увеличение же глубины резкости до 10 мкм приводит к получению разрешающей способности около 1,2 мкм.

Выполнение рассмотренных требований приводит к тому, что используемые оптические системы дают очень небольшие полезные поля.

Например, для совмещения элементов с размерами 2...5 мкм требуется увеличение в 200 раз. Если при этом необходима глубина резкости 10...15 мкм, то рабочее поле составляет около 1...3 мкм. Столь малое поле не позволяет качественно контролировать совмещение по всей подложке, имеющей значительно большие размеры. Поэтому в установках совмещения и экспонирования используются специальные двухпольные микроскопы, позволяющие наблюдать одновременно два удаленные друг от друга участка подложки.

Для облегчения операции совмещения фотошаблона с рисунком на подложке на фотошаблонах создаются фигуры совмещения — специальные топологические рисунки в виде щели, креста, штрихов и т. д.

Разрешающая способность контактной фотолитографии ограничена длиной волны излучения, к которому чувствительны разработанные фоторезисты. В результате дифракции света при контактной печати происходит расширение получаемого окна. Основываясь на теории дифракции Френеля, можно показать, что контактная печать при нулевом зазоре между фотошаблоном и подложкой и толщине фоторезиста 0,2 мкм позволяет получать размеры структур, сравнимые с длиной волны. В реальных процессах серийного производства контактная фотолитография позволяет получать в слое фоторезиста минимальный размер 0,8 мкм.

Повышение разрешающей способности фотолитографии может быть достигнуто применением проекционного экспонирования, при котором дифракционные явления, характерные для контактной

фотолитографии, подавляются. Схема проекционного экспонирования представлена на рис. 7.6, б. На подложку, покрытую слоем фоторезиста, с помощью системы объективов проецируется изображение подучаемого рисунка. Размеры рисунка на фотослаблоне могут превышать заданные, поэтому проектирование осуществляется в масштабе, например 10:1, 4:1 и др. К объективам при проекционной фотолитографии предъявляются достаточно жесткие требования, вызванные необходимостью получения высокого разрешения при больших размерах рабочего поля, соответствующих размеру подложки. Использование монохроматического излучения способствует удовлетворению этих требований. При проекционном экспонировании повышаются требования к плоскостности подложек и однородности толщины слоя фоторезиста.

Трудности в повышении разрешающей способности вызваны явлениями дифракции при экспонировании в монохроматическом свете. Многократные отражения на границах раздела фоторезист — пленка SiO_2 и пленка SiO_2 — подложка приводят к появлению стоячей волны светового излучения и расширению окна. Минимальный размер в слое фоторезиста, полученный при проекционной фотолитографии, составляет 0,4 мкм.

Технологические режимы экспонирования выбираются в соответствии с чувствительностью и выбранной толщиной слоя используемого фоторезиста. При выборе оптимального времени экспонирования следует учитывать также взаимосвязь времени экспонирования и проявления и стремиться к тому, чтобы время проявления было меньше, поскольку в этом случае снижается воздействие проявителя на неэкспонированные участки и уменьшается плотность дефектов. Вместе с тем, повышение времени экспонирования ограничено двумя факторами: снижением точности передачи размеров и плохой воспроизводимостью процесса.

Позитивные фоторезисты проявляются в сильно разбавленных растворах KOH и NaOH или тринатрийфосфат Na_3PO_4 . После проявления производят вторую сушку резиста (задубливание). Цель этой операции состоит в повышении адгезии и кислотостойкости. Сушка производится при температурах 130 ... 200 °С для резистов различных марок, как правило, в несколько этапов с постепенным повышением температуры. На этом завершается создание защитного рельефа фоторезиста.

Создание рельефа в диэлектрических и металлических пленках осуществляется локальным травлением свободных от фоторезиста участков. Выбор травителей определяется материалом обрабатываемых пленок. Для травления двуокиси кремния, боросиликатных и фосфоросиликатных стекол используются буферные травители, содержащие плавиковую кислоту и 40%-ный водный раствор фтористого аммония NH_4F в соотношении 1:2. Для трав-

ления алюминия используется смесь HF с водным раствором CrO_3 .

Для удаления фоторезиста используют кипячение в серной кислоте, обработку в горячей ($70 \dots 80^\circ\text{C}$) смеси деметилформамида и моноэтаноламина.

Фотошаблоны и методы их изготовления. Изображение в слое фоторезиста формируется с помощью фотошаблонов, представляющих собой прозрачные пластины с рисунком, состоящим из сочетания непрозрачных и прозрачных для света определенной длины волны участков, образующих топологию одного из слоев структуры приборов или элемента микросхемы, многократно повторенных в пределах поля пластины. Обычно используют металлоглазные фотошаблоны, в которых рисунок образуется тонкой металлической пленкой. Для изготовления фотошаблонов используются, в основном, два метода. Первый метод основан на сочетании оптических (фотографических) и прецизионных механических процессов. Суть метода состоит в механическом вырезании первичного оригинала (увеличенного в $200 \dots 500$ раз рисунка), в последующем фотографическом уменьшении размеров рисунка и его мультиплицировании.

При переходе к БИС топологический рисунок каждого слоя схемы (каждого стекла комплекта фотошаблонов) существенно усложняется. Если для простых микросхем число координатных точек на топологическом рисунке слоя составляет несколько сотен, то для БИС это число возрастает до нескольких сотен тысяч. При этом усложняются и операции вырезания первичного оригинала. Поэтому весьма заманчиво исключение этой операции из общего технологического цикла создания комплекта фотошаблонов.

Во втором методе — фотонаборе — весь топологический рисунок разделяется на прямоугольники различной площади и с различным отношением сторон в зависимости от формы и размеров составляющих его элементов. Эти прямоугольники последовательно фотопечатаются на фотопластину, где, в конечном счете, образуется промежуточный фотошаблон с десятикратным увеличением рисунка по сравнению с заданным.

Для проведения фотопечати разработаны специальные микрофотонаборные установки. Схема микрофотонаборной установки представлена на рис. 7.7. Основным узлом установки является наборная диафрагма, состоящая из четырех пластинок. Дискретным перемещением этих пластинок (обычно подвижны две из четырех), формируется прямоугольное окно с заданными размерами сторон. Шаг перемещения составляет в различных установках $10 \dots 100$ мкм (при расчете на окончателный размер рисунка фотошаблона $1,0 \dots 10$ мкм). Электродвигатель может осуществлять поворот всей диафрагмы. Пределы поворота составляют $\pm 45^\circ$.

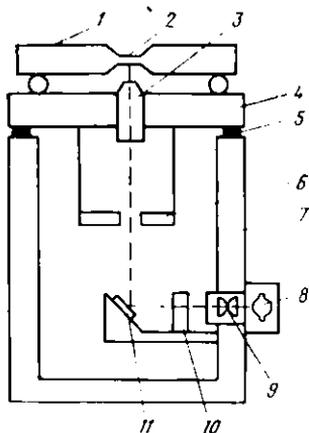


Рис. 7.7. Схема микрофотонаборной установки:

1 — координатный стол; 2 — фотопластина; 3 — проектор; 4 — основание; 5 — резиновые прокладки; 6 — наборная диафрагма; 7 — тумба; 8 — осветитель; 9 — конденсатор; 10 — зазор; 11 — зеркало

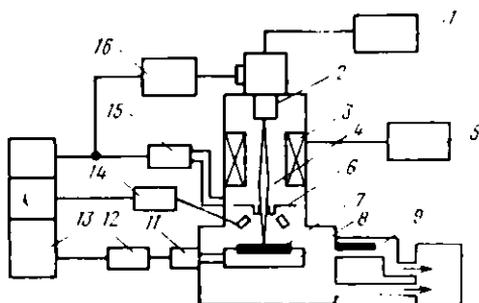


Рис. 7.8. Схема установки для экспонирования резиста сфокусированным пучком:

1 — источник питания электронной пушки; 2 — электронная пушка; 3 — система фокусирования пучка электронов; 4 — электронный пучок; 5 — устройство для возбуждения системы фокусирования; 6 — устройство отклонения электронного пучка; 7 — подложка; 8 — предметный стол; 9 — камера замены подложки; 10 — отключающая система; 11 — двигатель; 12 — привод двигателя; 13 — ЭВМ; 14 — детектор обратного рассеяния электронов; 15 — устройство управления сканированием электронного пучка; 16 — устройство для управления записью отклонения электронного пучка

Световой пучок, проходя снизу вверх через прямоугольную диафрагму и проектор, засвечивает фотопластину. Фотопластина закрепляется в координатном столе фоточувствительным слоем вниз. Координатный стол с высокой точностью перемещается по основанию. Для повышения точности перемещения координатного стола в некоторых установках используется воздушная подушка. Само основание располагается на амортизирующих резиновых прокладках на тумбе.

Работа на фотонаборных установках осуществляется с помощью ЭВМ. На первой стадии изготовления фотонаблюдков составляют программу фотонабора. При этом на перфорируемую ленту записывают координатные точки топологического рисунка слоя. Машина, обрабатывая введенные данные, разлагает топологический рисунок на элементарные прямоугольники, оптимизируя это разложение по минимальному числу экспозиций.

Последовательность операций изготовления промежуточного фотонаблюдка на микрофотонаборной установке состоит в следующем. В соответствии с полученной программой фотонабора ЭВМ

управляет координатным столом и устанавливает его в такое положение, когда центр экспонируемого прямоугольника совпадает с оптической осью проектора. При этом размер прямоугольника устанавливается автоматически благодаря управлению от ЭВМ подвижными пластинами наборной диафрагмы. После установления координатного стола в заданное положение происходит его остановка на время экспонирования. Затем происходит перемещение координатного стола на следующую позицию и устанавливается соответствующий этой позиции размер экспонируемого прямоугольника.

Типичные технические характеристики современных микрофотонаборных установок следующие: размер фотопластины 70×70 мм, шаг перемещения 2,5 мкм, точность позиционирования $\pm 1,5$ мкм, производительность 900 экспозиций/ч.

7.3. ЭЛЕКТРОНОЛИТОГРАФИЯ

Метод электронолитографии основан на использовании для экспонирования резистивных пленок электронных пучков. При взаимодействии такого пучка с резистом разрываются межатомные связи, что приводит к перестройке молекулярной структуры резиста. Длина волны электрона, ускоренного напряжением U , $\lambda \approx \approx 10^{-4} \sqrt{150/U}$. Если $U = 1,5 \cdot 10^4$ В, то $\lambda = 10^{-5}$ мкм, т. е. может быть на несколько порядков ниже длины волны светового излучения. При столь малых длинах волн, минимально возможные размеры рисунков при экспонировании резистов, определяются не дифракционным рассеянием, а условиями взаимодействия электронного пучка с системой резист - подложка.

В настоящее время разработаны установки для экспонирования резиста острогофокусированным пучком электронов (сканирующая электронолитография) и установки для проекционной электронолитографии. В установках последнего типа изображение создается прошедшим через шаблон широким электронным пучком.

Сканирующая электронолитография. Схема установки для экспонирования резиста сфокусированным пучком представлена на рис. 7.8. Установка содержит электронную пушку, систему фокусирования и отклонения электронного пучка, систему перемещения по координатным осям предметного столика, на котором располагается экспонируемая подложка. Включение и отключение электронного пучка, его сканирование, а также управление предметным столиком осуществляется с помощью ЭВМ.

В установках сканирующей электронолитографии используются два типа систем отклонения пучков — растровые и векторные. В растровых системах электронный пучок сканирует поверхность

подложки независимо от наличия или отсутствия рисунка. На участках, которые не должны экспонироваться, электронный пучок прерывается, для чего в установках предусматривается система включения и отключения (отведение в сторону специальными электродами) электронного пучка (рис. 7.9,а). В векторных системах электронный пучок сканирует только те участки подложки, которые должны быть экспонированы, при этом должен осуществляться точный вывод луча в начало координат очередного экспонируемого участка (рис. 7.9,б).

В обеих системах размер экспонируемого участка составляет несколько квадратных миллиметров. Для экспонирования топологического рисунка на всей подложке нужно передвигать предметный столик с ней в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Используются шаговое и непрерывное перемещения. При шаговом перемещении столик останавливается на время экспонирования, а затем перемещается в новое положение и производится экспонирование следующего участка подложки. При этом скорость столика непостоянна. Какое-то время затрачивается на его разгон и торможение, поэтому производительность процесса экспонирования снижается.

При непрерывном перемещении столика одновременно происходит и экспонирование. Такое перемещение применяется только для растровых отклоняющих систем. Столик и пучок электронов движутся во взаимно перпендикулярных направлениях. Скорость движения столика задается такой, чтобы за время сканирования полосы и обратного возвращения луча столик переместился на ширину линии экспонирования. Такой способ более производительен. Точность перемещения столика -- до 0,1 мкм. Контроль перемещения осуществляется лазерными интерферометрами.

При использовании электронолитографии непосредственно для изготовления микросхем необходимо обеспечить точность совмещения рисунков различных топологических слоев. Положение подложки при первой литографии принимается за эталонное. При повторном и последующих помещении подложки на предметный столик могут возникнуть отклонения от эталонного положения, поэтому необходимо вводить коррекцию на положение подложки. Для проведения процессов совмещения на подложке создаются специальные маркерные метки. Метки должны быть выполнены так, чтобы при сканировании по ним электронного пучка на соответствующих детекторах возникли сигналы, обусловленные либо отраженными, либо вторичными электронами.

Суть процесса совмещения состоит в следующем. Электронный пучок сниженной мощности по сравнению с экспонирующим (чтобы избежать воздействия на резист) при пересечении маркерной

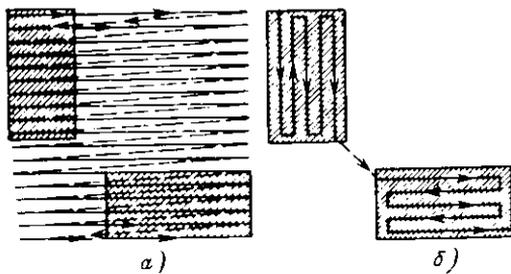


Рис. 7.9. Способы сканирования электронного луча:
а — растровый; б — векторный

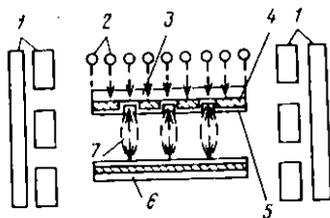


Рис. 7.10. Схема установки проекционной электролитографии:

1 — система фокусировки и отклонения; 2 — ультрафиолетовые лампы осветителя; 3 — кварцевая пластина; 4 — пленка двуокиси титана; 5 — пленка палладия; 6 — окисленная пластина кремния с пленкой резиста; 7 — траектория электронов

метки в процессе сканирования вызывает появление сигнала на детекторе электронов. По результатам сканирования метки (обычно во взаимно перпендикулярных направлениях) вычисляется положение ее осей относительно оси электронно-оптической системы, определяется ошибка и корректируется положение столика с подложкой. По достижении требуемого совмещения производится экспонирование; перед экспонированием следующего участка подложки операции совмещения повторяются.

Маркерные метки обычно выполняются в виде ступеньки в кремнии, в осажденных на него пленках двуокиси кремния или металлов с большими атомными номерами. Коэффициент отражения электронов возрастает с увеличением высоты ступеньки и уменьшением отклонения ее стенки от вертикали. Обычно высота ступеньки составляет несколько микрон.

Установки сканирующей электролитографии имеют следующие достаточно типичные характеристики. Максимальные размеры обрабатываемых подложек составляют 80×80 мм² для кремния и 102×102 мм² для шаблонов, максимальные размеры участка сканирования 2×2 мм², точность совмещения 0,1 мкм. Плотность тока электронного пучка составляет несколько ампер на квадратный сантиметр. Ускоряющее напряжение составляет 30 кВ. Производительность установок до 5 пластин/ч.

Электропорезисты — высокомолекулярные соединения, химические и физические свойства которых изменяются под действием

повижающей реакции. Разработаны негативные и позитивные резисты, из последних наиболее широко используются резисты на основе полиметилметакрилата (ПММА).

Для оптимизации процесса экспонирования с целью получения минимального размера большое значение имеет правильный выбор ускоряющего напряжения, так как от него зависит минимальный диаметр сфокусированного пучка электронов и ореол их рассеяния. Вследствие рассеяния электронов, отражения их от границы с подложкой и образования достаточно энергетичных вторичных электронов диаметр области резиста, экспонируемого электронами, превышает диаметр электронного пучка. Оценки показывают, что минимально достижимый размер рисунка равен сумме диаметра пучка электронов и толщины слоя резиста.

Проекционная электронолитография. Схема установки для проекционной электронолитографии представлена на рис. 7.10. В этой установке основным элементом является освещаемый ультрафиолетовым светом фотокатод, который служит одновременно и источником электронов и шаблоном с рисунком той конфигурации, которая должна быть получена на подложке. Фотокатод представляет собой отполированную кварцевую пластину, на поверхность которой нанесена пленка двуокиси титана по рисунку, соответствующему одному из слоев микросхемы. На эту пленку напыляется сплошная пленка палладия толщиной около $4 \cdot 10^{-3}$ мкм. Выбор этих материалов основан на хорошем поглощении ультрафиолетового света пленкой двуокиси титана и хорошими фотоэмиссионными свойствами палладия. Те участки палладия, которые не защищены двуокисью титана, под действием ультрафиолетового света испускают электроны. Электроны вылетают под разными углами к поверхности, затем ускоряются электрическим полем, фокусируются и направляются на покрытую резистом подложку. Совмещение рисунков, как и для предыдущей установки, производится с помощью реперных знаков, создаваемых в процессе первой литографии.

По сравнению с установкой экспонирования сфокусированным пучком данная установка отличается более высокой производительностью.

Достигнутое разрешение при проекционной электронолитографии составляет 0,1 мкм.

Общий недостаток всех систем электронолитографии состоит в необходимости помещения подложек в вакуум, что в целом усложняет технологический процесс литографии. Поэтому электронолучевая литография наиболее эффективно используется для создания фотошаблонов и шаблонов для рентгенолучевой и ионной литографий.

7.4. РЕНТГЕНОЛУЧЕВАЯ И ИОННАЯ ЛИТОГРАФИИ

Рентгенолучевая литография. При рентгенолучевой литографии поток рентгеновских лучей (с длиной волны 0,4 ... 1,4 нм) направляется на шаблон, под которым располагается подложка, покрытая резистом, чувствительным к указанному излучению (рис. 7.11). Время экспонирования составляет несколько минут.

Выбор диапазона длин волн рентгеновского излучения обусловлен свойствами материалов (резистов), хорошо поглощающих и изменяющих под его воздействием свою структуру. Кроме того, при выборе длин волн рентгеновского излучения следует исходить из необходимости включать поглощение излучения подложкой, которое становится достаточно сильным при $\lambda = 10$ нм. Найдены и разработаны органические материалы, которые в области рентгеновского излучения (порядка 0,4 ... 5 нм) могут быть использованы в качестве резистов.

Для изготовления шаблона можно использовать кремний, так как в виде тонких пленок (толщиной несколько микрон) он прозрачен для рентгеновского излучения. Негативное изображение рисунка микросхемы (собственно защитная маска от рентгеновских лучей) создается из пленки золота толщиной около 0,3 мкм, нанесенной на тонкий слой кремния. Выбор золота обусловлен его максимальной способностью поглощать рентгеновские лучи по сравнению с другими распространенными материалами.

Изготовить шаблоны, в частности получить тонкие кремниевые пленки, можно по следующей технологии. Пластина кремния с поверхностью, ориентированной по плоскости (100), толщиной около 200 мкм, вытравливается локально в анизотропных травителях. При этом глубина вытравленных углублений отличается от толщины пластины всего на несколько микрометров. Площадь локально вытравленной области соответствует площади, занимаемой микросхемой.

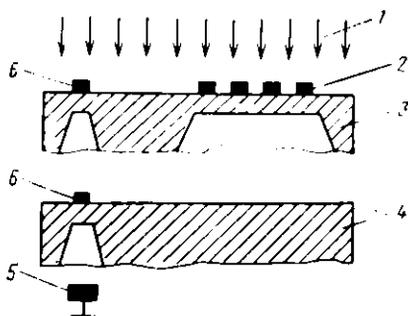


Рис. 7.11. Иллюстрация принципа рентгенолучевой литографии:

1 — рентгеновское излучение; 2 — рисунок на основе пленки золота; 3 — кремниевый шаблон; 4 — кремниевая подложка; 5 — детектор рентгеновского излучения; 6 — маркерные знаки

Процесс травления для получения тонкой перемычки можно достаточно точно контролировать, если пластину кремния предварительно пролегируют и создать диффузионный слой с высокой концентрацией примеси, например бора, и толщиной, равной толщине будущей перемычки. Можно подобрать такие анизотропные травители, в которых скорость травления сильнолегированных слоев существенно ниже скорости травления высокоомного кремния. Поэтому процесс травления практически прекратится, когда травитель стравит кремний почти на всю толщину пластины и дойдет до диффузионного слоя. При рентгенолучевой литографии совмещение рисунков может проводиться двумя способами: с использованием рентгеновского излучения и оптическое. В последнем случае должен быть использован шаблон, в котором защитная маска из золота нанесена на мембрану, прозрачную для видимого света. В этом случае при изготовлении шаблона на поверхность кремния наносится пленки таких материалов, как нитрид кремния, нитрид бора, карбид кремния или многослойные комбинации. При этом локальное травление кремния проводится с обратной стороны пластины до вскрытия материала мембраны.

Для совмещения шаблона и подложки с использованием рентгеновского излучения рядом с основными создают дополнительные мембраны, на которых располагают метки совмещения. Снизу подложки под меткой совмещения помещается детектор рентгеновских лучей, с помощью которого можно сформировать сигнал рассогласования. Оптическое совмещение производится вне зоны экспонирования. По завершении совмещения скрепленные подложка и шаблон экспонируются.

Источниками рентгеновского излучения могут быть рентгеновские трубки с электроно-лучевым распылением металлов с алюминиевых или медных мишеней; ускоряющее напряжение составляет около 8 кВ. Перспективно использование синхротронного излучения в качестве источника рентгеновских лучей.

Минимальный размер, получаемый рентгенолучевой литографией, составляет 0,1 мкм. Повышение разрешающей способности ограничено образованием вторичных электронов, распространяющихся на расстояния около 0,1 мкм, и способных вызывать структурные изменения в резисте, аналогичные происходящим при воздействии на резист рентгеновского излучения.

Наряду с высокой разрешающей способностью рентгенолучевая литография обладает еще рядом достоинств. Одним из них является нечувствительность к загрязнениям, поскольку пылинки и другие инородные частицы на поверхности подложки не поглощают рентгеновского излучения. Кроме того, процесс рентгенолучевой литографии проводится в безвакуумной среде, на более простом и дешевом оборудовании, чем при электронно-лучевой литографии.

Рисунок создается на шаблоне методом электронно-лучевой литографии, поскольку это практически единственный метод по-

лучить шаблон с высоким разрешением, обеспечивающий реализацию возможностей рентгенолучевой литографии. Поэтому субмикронные размеры рисунка микросхемы являются результатом комбинации методов электронно-лучевой и рентгенолучевой литографий.

Ионная литография. Для микросхем с субмикронными размерами элементов перспективен метод ионной литографии. Потоки ионов различных газов, например водорода, азота, неона и аргона, ускоренных до энергий 60 ... 100 кэВ, могут приводить в определенных веществах к перестройке их молекулярной структуры и изменению химических свойств.

Экспонирование резистов осуществляется либо фокусированным, либо коллимированным пучком ионов. В первом случае заданный рисунок получают сканированием фокусированного пучка по поверхности подложки с нанесенным резистом, во втором -- облучением шаблона, располагаемого с определенным зазором над поверхностью подложки.

Шаблон представляет собой кремниевую мембрану, на которой из пленки золота создается рисунок маски, защищающей от потока ионов. Толщина пленки золота, достаточная для поглощения ионов, составляет около 0,7 мкм. Совмещение получают в процессе детектирования ионов, обратно рассеянных от специально изготавливаемых референсных меток. Точность совмещения составляет $\pm (0,05 \dots 0,1)$ мкм, разрешающая способность 0,2 мкм.

По сравнению с электронолитографией при ионной литографии значительно снижается размер области, экспонируемой за счет рассеяния воздействующих на резист частиц. Поэтому можно уменьшить размеры элементов в субмикронном диапазоне и тем самым в два — пять раз повысить степень интеграции микросхем.

При электронолитографии с целью снижения размеров элементов и повышения разрешающей способности используют очень тонкие слои резиста, поскольку именно толщина слоя резиста наряду с диаметром электронного луча определяет размер экспонированной области. При ионной литографии нет необходимости в использовании очень тонких слоев резиста для улучшения разрешающей способности. Возможность увеличения толщины резиста до 1 мкм и выше приводит к тому, что плотность дефектов, например проколов в слое резиста становится низкой и тем самым повышается вероятность выхода годных микросхем.

Еще одним достоинством ионной литографии является простота получения коллимированных ионных пучков достаточной интенсивности и компактности их источников.

Изменением состава ионов в пучках можно полностью сформировать структуру интегральной микросхемы, используя ионные пучки элементов III и V групп периодической системы для легиро-

вания ионным внедрением, а ионные пучки газов для литографии.

Перспективно еще одно направление в технологии интегральных микросхем: формирование структур элементов ионным внедрением примесей методом прецизионного сканирования фокусированным ионным пучком без применения резистов и шаблонов.

Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

8.1. ВВЕДЕНИЕ

Полупроводниковые микросхемы подразделяются на биполярные и МОП-схемы, отличающиеся типом основного элемента — биполярного или МОП-транзистора. Конструктивное различие отражается на их электрических характеристиках и функциональной сложности.

Технологии изготовления биполярных и МОП-микросхем очень близки, так как в основе их создания лежит планарная технология со всеми ее преимуществами и особенностями. Однако нужно отметить и ряд специфических аспектов, например особую значимость способов изоляции элементов в биполярных микросхемах, во многом определяющих всю последовательность операций технологического цикла. В МОП-микросхемах специфическими операциями являются получение и обработка тонких пленок подзатворного диэлектрика. Разработана БИМОП-технология интегральных микросхем, в которой используется элементная база обоих типов: биполярные и МОП-транзисторы.

Технологический процесс производства кремниевых микросхем — многооперационный и длительный. Он включает разнородные физические, химические и металлургические процессы, такие как диффузия, ионное внедрение примесей, химическая обработка, ионно-плазменная и плазмохимическая обработка, фотолитография, нанесение и вжигание тонких пленок и ряд других. Общее число технологических операций превышает 500, а при изготовлении БИС — 800. Длительность технологического цикла до 50 дней.

Переход к БИС и СБИС вызвал необходимость не только в существенном совершенствовании основных операций формирова-

ния структуры элементов: эпитаксии, диффузии, ионного легирования, термического окисления, фотолитографии, но и в разработке совершенно новых процессов, которые не применялись на ранних стадиях изготовления микросхем. В первую очередь необходимо отметить принципиально новые методы создания фотошаблонов — метод фотонабора с широким привлечением ЭВМ для автоматизации процесса. Развиваются методы литографии в более коротковолновом, по сравнению с оптическим, диапазоне электромагнитного излучения. Осуществлен переход к ионно-плазменным и плазмохимическим методам обработки тонких пленок вместо широко применяемого ранее жидкостного химического травления. Появились и новые операции в связи с созданием двухуровневой электрической разводки в БИС и СБИС.

Основные технологические операции уже были рассмотрены в предыдущих главах. В дополнение к ним рассматриваются методы создания электрической изоляции между элементами и заключительные технологические операции — сборка и герметизация.

8.2. МЕТОДЫ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ В БИПОЛЯРНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Тенденцией развития интегральных микросхем является повышение степени интеграции, плотности компоновки элементов и быстродействия. В решении этих задач, помимо уменьшения размеров элементов, определяющую роль играет разработка методов их изоляции, позволяющих существенно сократить размеры изолирующих областей и электрическую связь между элементами. При создании полупроводниковых микросхем малой и средней степени интеграции широко используются методы изоляции обратного смещенным $p-n$ переходом. Для БИС разработана изоляционная технология изоляции с одновременным использованием и обратного смещенного $p-n$ перехода, и диэлектрических пленок. В схемах специального назначения используется метод изоляции пленкой SiO_2 (эпик-процессе).

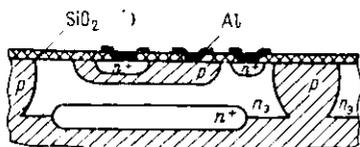


Рис. 8.1. Структура транзистора, изолированного $p-n$ переходом

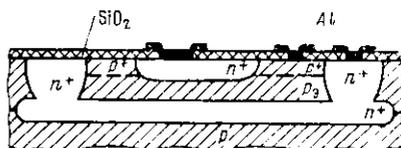


Рис. 8.2. Структура транзистора с коллекторной изолирующей диффузией

Изоляция p - n переходом и диэлектрическими пленками. На рис. 8.1 представлена структура транзистора микросхемы, изолированного p - n переходом. В основе лежит пластина кремния p -типа ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) с эпитаксиальным слоем n -типа ($\rho = 1,0 \dots 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и толщина $5 \dots 15 \text{ мкм}$) и скрытым слоем n' -типа (удельное поверхностное сопротивление слоя $10 \dots 75 \text{ Ом}/\square$, толщина $7 \dots 8 \text{ мкм}$). Изолирующий p - n переход создается диффузией акцепторной примеси на глубину, обеспечивающую соединенные диффузионной области с p -подложкой. Таким образом, происходит разделение эпитаксиального слоя n -типа на отдельные, изолированные друг от друга n -области.

Очевидно, что плотность элементов микросхемы зависит от размеров разделительных диффузионных областей. Расстояние между двумя изолирующими p - n переходами определяется двумя факторами: размером вскрытого окна в маскирующей пленке SiO_2 и глубиной боковой диффузии, примерно равной толщине эпитаксиального слоя. В микросхемах малой степени интеграции расстояние составляет $35 \dots 40 \text{ мкм}$ (при толщине слоя около 10 мкм и ширине окна 10 мкм).

Разновидностью метода изоляции p - n переходом является коллекторная изолирующая диффузия (КИД). Структура биполярного транзистора при данном методе изоляции представлена на рис. 8.2. На исходной пластине кремния p -типа с эпитаксиальным слоем p -типа и скрытым слоем n' -типа изоляция осуществляется диффузией донорной примеси, т. е. созданием сильно легированных n' -областей, смыкающихся со скрытым n' -слоем. Объединенная таким образом n' -область является коллектором транзистора. Эпитаксиальный слой p -типа является базой. Долегирование акцепторной примесью этого слоя позволяет исключить большой разброс его сопротивления, обусловленный проникновением примеси из скрытого слоя. Особенности микросхем с такой изоляцией состоят в высокой степени легирования коллекторной области, что снижает накопление в ней носителей заряда, но приводит к уменьшению напряжения пробоя коллектора.

На рис. 8.3 представлены структуры, иллюстрирующие последовательность технологического процесса изоляции элементов тонкими диэлектрическими пленками (эпик-процесс). На исходной пластине кремния n -типа выращивается эпитаксиальный n' -слой. На поверхности пластины создается рельеф при локальном анизотропном травлении на глубину $20 \dots 30 \text{ мкм}$. Рельефная поверхность термически окисляется, получается изолирующая пленка SiO_2 толщиной около 1 мкм . На поверхность SiO_2 наносится пленка Si_3N_4 , а затем слой поликристаллического кремния. При этом используются методы, разработанные для эпитаксиального наращивания кремния. Толщина поликристаллического слоя составля-

ет 200 ... 250 мкм. Исходный монокристалл кремния сошлифовывается до дна вытравленных канавок. Таким образом, в поликристаллическом кремнии образуются изолированные друг от друга слоем SiO_2 монокристаллические области. В дальнейшем в этих областях создаются элементы интегральной микросхемы.

Существенным недостатком этого метода изоляции является необходимость прецизионной шлифовки. Точность существенно возрастает, когда на поверхность SiO_2 наносится пленка нитрида кремния. Высокая твердость нитрида кремния способствует точности контроля процесса шлифовки, поскольку скорость шлифовки резко снижается, как только вскрывается пленка нитрида кремния. Однако после высокотемпературных обработок (окисление, выращивание поликристалла) у пластин кремния наблюдается прогиб. Он приводит к тому, что после шлифовки отдельные области исходного монокристалла имеют значительный разброс по толщине.

Диэлектрическая изоляция позволяет на несколько порядков снизить токи утечки изоляции и на порядок — удельные емкости по сравнению с $p-n$ переходом. Однако отмеченные технологические недостатки эпитаксиального процесса заставляют вести поиск новых методов, в частности, комбинирующих изоляцию диэлектриком и $p-n$ переходом.

Изопланар. Совершенствование технологии эпитаксиального наращивания, в частности подавление автолегирования и уменьшение скорости диффузии примеси из скрытого слоя, привело к возможности существенно снизить толщину эпитаксиальных слоев. Получение более тонких эпитаксиальных слоев (толщиной 1 ... 3 мкм) позволило не только повысить плотность элементов при изоляции $p-n$ переходом, но и привело к созданию новых методов изоляции. Совместное использование диэлектрических слоев и $p-n$ переходов для изоляции элементов микросхем характерно для изопланарной технологии.

На рис. 8.4 представлена структура транзистора, изготовленного по изопланарной технологии. На исходной подложке кремния p -типа с эпитаксиальным слоем n -типа и скрытым слоем n -типа изоляция создается локальным окислением эпитаксиального слоя по всей его толщине. При этом толщина эпитаксиального слоя не должна превышать 1 мкм, так как рост толстых слоев SiO_2 при термическом окислении происходит по параболическому закону и получение слоев SiO_2 толщиной более 1 мкм затруднено. В результате локального окисления образуются области, изолированные $p-n$ переходом на «дне» и слоем SiO_2 на боковых стенках. Маскирующим покрытием при локальном окислении служит пленка нитрида кремния Si_3N_4 , которая практически не окисляется. После создания изолированных областей формируется транзистор-

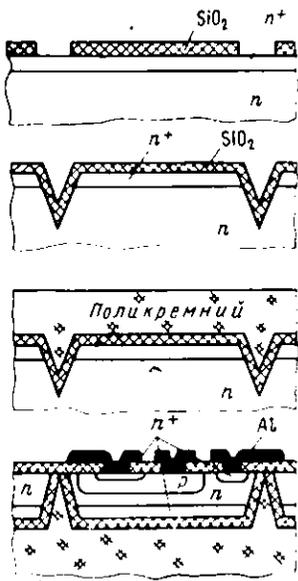


Рис. 8.3. Схема эпитаксиального процесса

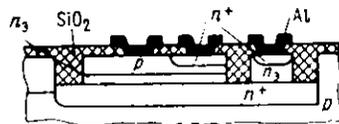


Рис. 8.4. Структура изопланарного транзистора



Рис. 8.5. Увеличение размера изолирующей области SiO_2 из-за боковой диффузии кислорода и повышения коэффициента диффузии в приповерхностной области

ная структура. Поскольку база или эмиттер транзистора могут примыкать непосредственно к изолирующей области SiO_2 , то общая площадь, занимаемая транзисторной структурой, сужается. Эта особенность изопланарной технологии исключительно важна при изготовлении БИС.

В рассмотренном варианте изопланарная технология СВИС со сверхмалыми размерами элементов (до 1 мкм), обеспечивая в целом высокую плотность компоновки элементов, имеет существенные недостатки из-за дефектов, возникающих при локальном окислении. Один из них представлен на рис. 8.5. В зарубежной литературе показанный дефект получил название «птичий клюв». Из-за боковой диффузии кислорода изолирующая область по своим размерам превосходит окно, открытое в маскирующем слое Si_3N_4 . Кроме того, в силу возникновения механических напряжений в кремнии при осаждении на его поверхности слоя Si_3N_4 в нем возникают структурные дефекты, повышающие коэффициенты диффузии кислорода, особенно в приповерхностном слое. В результате изолирующая область расширяется и ограничивает плотность компоновки элементов. В рассматриваемой транзисторной структуре изолирующий слой SiO_2 создается и в изолированном «кармане»,

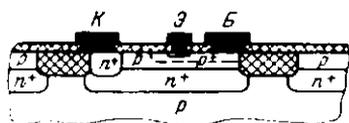


Рис. 8.6. Структура изопланарного транзистора с глубокой коллекторной областью

разделяя в транзисторной структуре эпитаксиальную коллекторную область. Такая конструктивная особенность транзистора приводит к снижению сопротивления базовой области.

На рис. 8.6 представлена модификация рассмотренной структуры транзистора, полученная в процессе, названном «изопланар II». В ней дополнительно создается глубокая n^+ -область коллекторного контакта, соединяющаяся со скрытым слоем, что позволяет снизить сопротивление вертикальной составляющей области коллектора.

При локальном окислении толщина изолирующего слоя SiO_2 больше толщины эпитаксиального слоя. В результате на рабочей поверхности появляется значительный рельеф. Сглаживание рельефа поверхности подложки называется планаризацией поверхности. Для планаризации поверхности проводится подтравливание подложки в местах локального окисления. Подтравливание должно проводиться на такую глубину, чтобы после окисления получить поверхность SiO_2 , совпадающую с поверхностью подложки (рис. 8.7.а). Однако нужно отметить, что полное совпадение уровней кремния и локального SiO_2 не достигается. Реальный рельеф на границе изолирующего оксида представлен на рис. 8.7.б. Показанная форма изолирующего слоя SiO_2 образуется в результате того, что при частичном травлении эпитаксиального слоя происходит подтравливание под защитную маску из нитрида кремния. В результате этого поверхность кремния под пленкой Si_3N_4 становится доступной для термического окисления. Однако на вытравленных участках под Si_3N_4 растет слой SiO_2 , выступающий над поверхностью подложки из-за меньшей глубины подтравливания. Образующийся рельеф получил название «гитичья голова».

Пример. Найти относительную глубину локального подтравливания эпитаксиального слоя кремния толщиной h_x , обеспечивающую после разделительного окисления планарность кремниевой подложки (рис. 8.7.а).

Для сохранения планарности объем двуокиси кремния должен быть равен $V_{\text{ок}} = h_x S$, а его масса $P_{\text{ок}} = h_x S \rho_{\text{ок}}$; а объем и масса невытравленного кремния соответственно $V_{\text{к}} = h_x S$ и $P_{\text{к}} = h_x S \rho_{\text{к}}$, где S — площадь изолирующего SiO_2 , $\rho_{\text{ок}}$ и $\rho_{\text{к}}$ — плотности двуокиси кремния и кремния. В соответствии с реакцией окисления $\text{Si} + \text{O}_2 =$

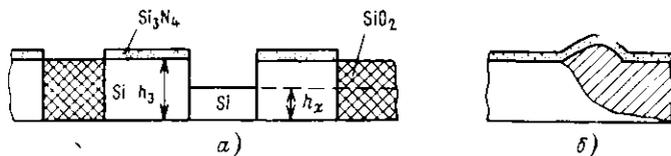


Рис. 8.7. Форма изолирующего оксида при подтравливании подложки с полной планаризацией поверхности (а) и с выступами на краях изолирующего оксида (б)

= SiO₂ из одного граммоля кремния M_K образуется один граммоль двуокиси кремния M_{ок}. Значит, $P_K/P_{ок} = M_K/M_{ок}$; $\frac{h_x}{h_3} = \frac{M_K \cdot \rho_{ок}}{M_{ок} \cdot \rho_K}$
 $M_K = 28 \text{ г}$, $M_{ок} = 28 + 2 \cdot 16 \text{ г} = 60 \text{ г}$, $\rho_K = 2,33 \text{ г/см}^3$, $\rho_{ок} = 2,27 \text{ г/см}^3$.
 Отсюда $\frac{h_x}{h_3} = \frac{28 \cdot 2,27}{60 \cdot 2,33} = 0,454$, $(h_3 - h_x)/h_3 = 0,545$.

Изоляция V-образными и U-образными канавками. Структура транзистора с V-образной изолирующей канавкой представлена на рис. 8.8. Канавки образуются в процессе анизотропного травления кремния после формирования базовых и эмиттерных областей транзисторов. После термического окисления подложки и осаждения на нее нитрида кремния V-образная канавка заполняется легированным поликремнием. С остальной поверхности подложки поликремний удаляется полировкой (при этом Si₃N₄ в силу своей высокой твердости ограничивает процесс полировки) или травлением. В микросхемах с такой изоляцией, а особенно с изоляцией U-образными канавками, получившей также название целевой (рис. 8.9), можно повысить плотность компоновки элементов.

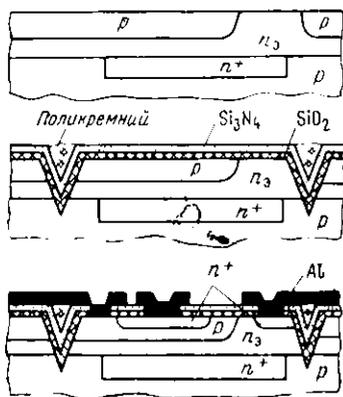
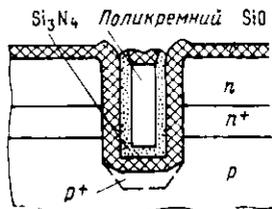


Рис. 8.8. Структура транзистора с V-образной изоляцией на различных этапах технологического процесса

Рис. 8.9. U-образная изолирующая область



8.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Технологические процессы будут рассмотрены на примере создания двух видов интегральных микросхем: малой степени интеграции на основе биполярных транзисторов с изоляцией элементов *p-n* переходом и на основе изопланарной технологии.

Биполярные микросхемы с изоляцией *p-n* переходом. Структура биполярного транзистора микросхемы была рассмотрена ранее (см. рис. 8.1). Схема технологического процесса представлена на рис. 8.10. В качестве исходных используются кремниевые подложки с эпитаксиальной структурой *p-n* и скрытым n^+ -слоем.

Типовой процесс обработки перед окислением рассмотрен в первой главе. Термическое окисление проводится для получения на поверхности кремния пленки SiO_2 толщиной 0,8 мкм. На ней в процессе первой фотолитографии формируется защитная маска под локальную (разделительную) диффузию бора с целью создания изолирующих областей *p*-типа. Окисление проводится в потоке кислорода с изменением его влажности в три этапа: сухой — влажный — сухой.

При разделительной диффузии в качестве источника диффузанта используется VBg_3 . Диффузия проводится в две стадии. Между двумя стадиями с поверхности кремния удаляется боросиликатное стекло $m\text{B}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$. Для травления используется плавиковая кислота HF . В процессе второй стадии диффузии, проводимой, в отличие от первой, в окислительной среде, создается новая пленка SiO_2 , выполняющая в дальнейшем не только маскирующие, но и защитные функции. После разделительной диффузии образуются диффузионные слои *p*-типа с сопротивлением 2 ... 12 Ом/□.

Для создания транзисторной структуры в качестве источников диффузантов используются VBg_3 и PCl_3 (или POCl_3). Диффузионный процесс получения базовой области проводится также в две стадии. На первой стадии создается сильно легированный тонкий слой p^+ -типа с сопротивлением около 90 Ом/□. На этой стадии для удаления боросиликатного стекла используется химическое травление в растворе следующего состава: 10 частей HNO_3 , 15 частей HF и 300 частей H_2O . Этот раствор с высокой скоростью травит боросиликатное и фосфоросиликатное стекла, практически не разрушая SiO_2 . После удаления боросиликатного стекла проводится вторая стадия диффузии, в процессе которой толщина слоя увеличивается до 1,8 ... 2,2 мкм, а его удельное сопротивление (в результате перераспределения бора) повышается до 170 ... 200 Ом/□. Поскольку вторая стадия проводится в окислительной среде,

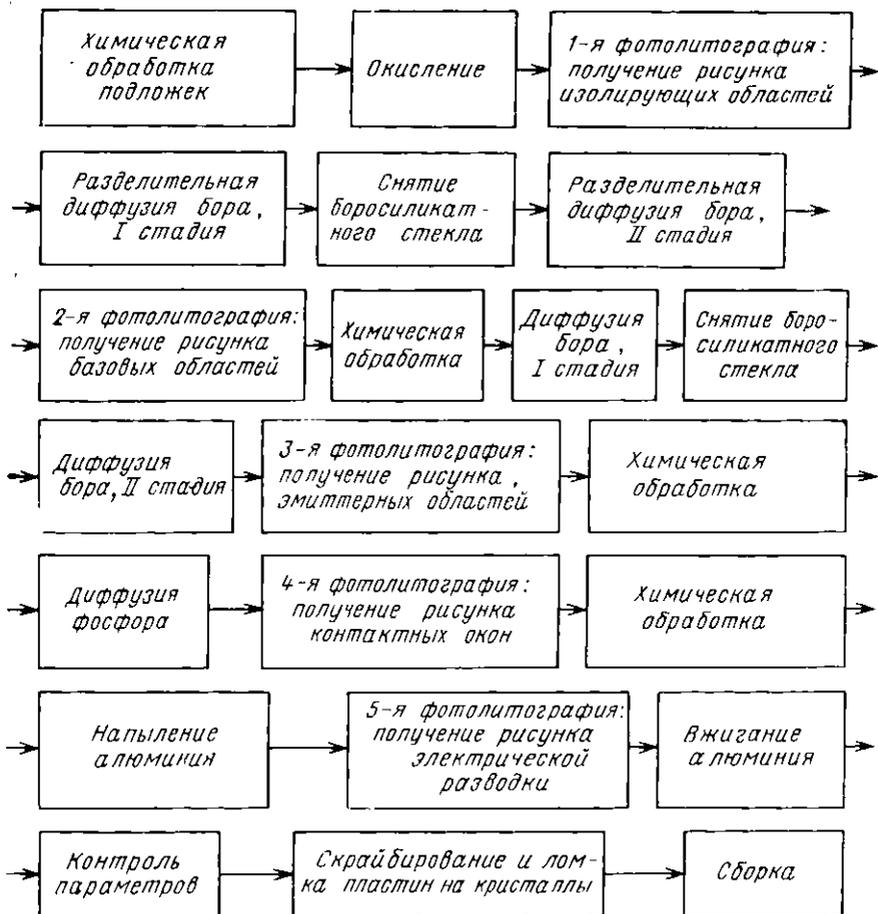


Рис. 8.10. Последовательность технологических операций изготовления биполярной микросхемы

на поверхности кремния образуется пленка SiO_2 толщиной около 0,4 мкм. На ее основе формируется маска для проведения локальной диффузии при создании эмиттерной области. Толщина диффузионного эмиттерного слоя 1,0... 1,4 мкм, удельное сопротивление слоя 3... 5 Ом/□.

Электрическая разводка создается нанесением алюминия, фотолитографией и вжиганием алюминия в водороде при $T=500^\circ\text{C}$.

После всех процессов фотолитографии проводится химическая очистка по единой схеме: кипячение в смеси $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2$

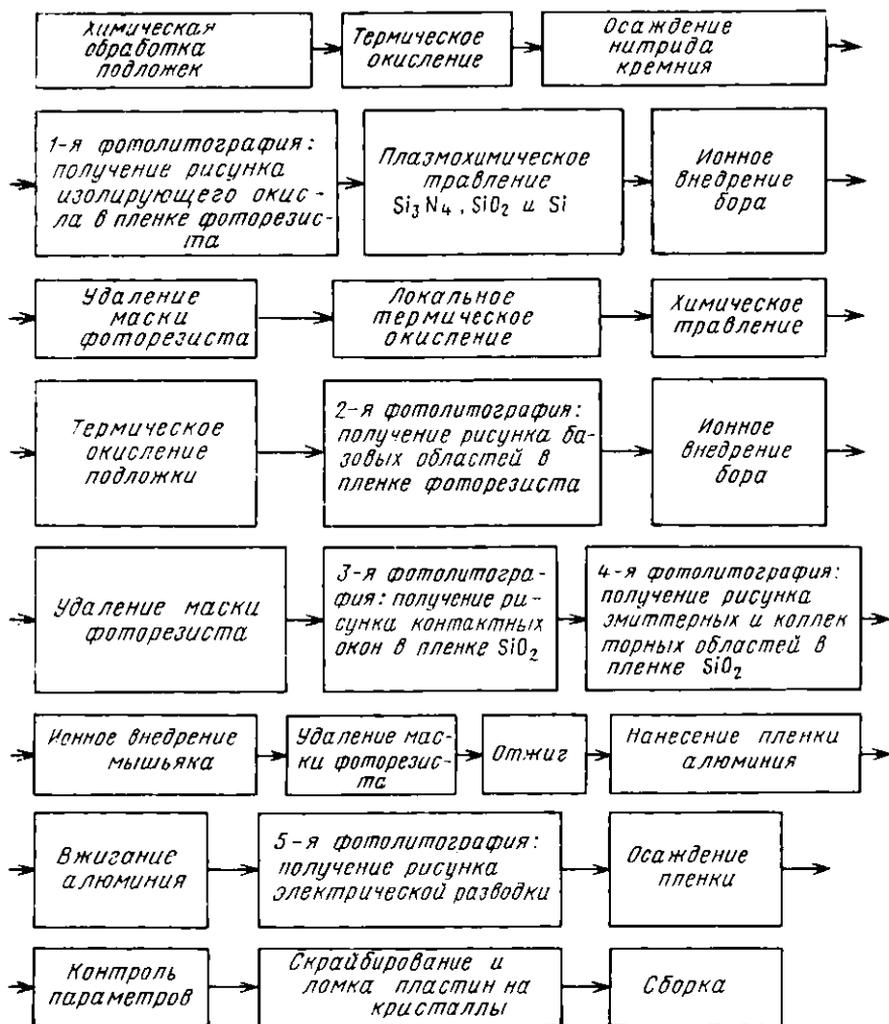
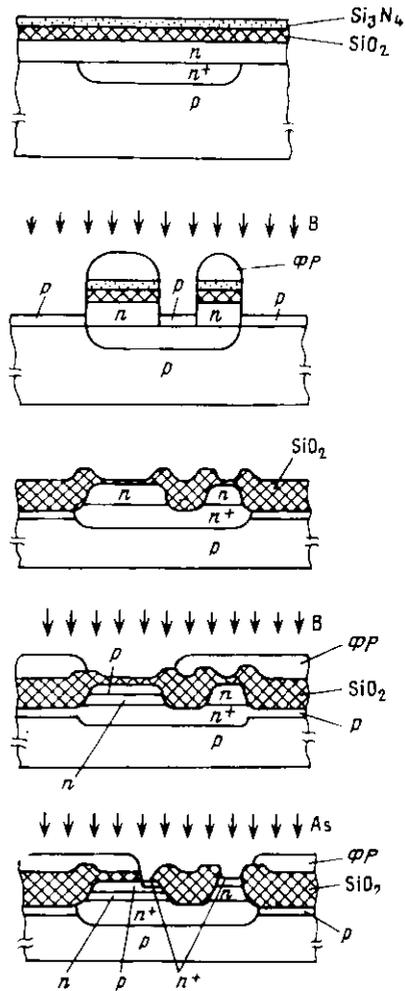


Рис. 811. Последовательность технологических операций изготовления изопланарной биполярной микросхемы

(1 : 1 : 1), промывка в деионизованной воде.

Технологический процесс изопланарной биполярной микросхемы. Этот процесс будет рассмотрен на примере микросхемы, основным элементом которой является транзистор, изображенный на рис. 8.4. Последовательность технологических операций и структуры транзистора на различных этапах изготовления представле-

Рис. 8.12. Структура биполярного транзистора на различных этапах изопланарного процесса:
ФР — фоторезист



ны соответственно на рис. 8.11 и 8.12. В качестве подложек используются слабо легированные пластины кремния с эпитаксиальными слоями n -типа (концентрация примеси $10^{15} \dots 10^{16} \text{ см}^{-3}$) и скрытыми слоями n^+ -типа с поверхностным сопротивлением $15 \dots 50 \text{ Ом/}\square$. Как уже отмечалось (см. гл. 5), уровень поверхности участков со скрытыми слоями ниже уровня остальной поверхности подложки, что дает возможность после эпитаксиального наращивания совмещать рисунок скрытого слоя с рисунками в других слоях транзисторной структуры. При диффузионном введении примеси в скрытые слои углубления образуются за счет химической реакции ангидрида примеси с кремнием в области вскрытого в SiO_2 окна; при ионном внедрении примеси — за счет разницы в скоростях окисления чистого кремния в области окна и окисления кремния на остальной поверхности при проведении в окисляющей атмосфере процесса разгонки внедренной примеси с одновременным отжигом радиационных дефектов.

Первая группа технологических операций направлена на получение электрической изоляции между элементами схемы. На поверхности подложки термическим окислением создается пленка SiO_2 , на которую осаждается из парогазовой смеси пленка нитрида кремния Si_3N_4 , выполняющая роль маскирующего покрытия при локальном окислении кремния. Толщина пленки Si_3N_4 $0,1 \text{ мкм}$. Подслой SiO_2 толщиной $0,05 \text{ мкм}$ является буфером между кремнием и нитридом кремния. Его присутствие снижает механические

напряжения в кремнии, вызванные высокой твердостью Si_3N_4 , и тем самым снижает эффективность приповерхностной диффузии кислорода и вероятность образования структуры типа «птичий клюв».

Первый процесс фотолитографии проводится с целью получения рисунка изолирующих областей SiO_2 . Используя фоторезист (ФР) в качестве защитной маски плазмохимическим травлением во фторсодержащей плазме $\text{CF}_4 + \text{O}_2$ травлятся пленки Si_3N_4 , SiO_2 , а также часть эпитаксиального слоя, составляющая 0,55 его общей толщины. В этом случае происходит планаризация поверхности подложки, т. е. изолирующий слой SiO_2 растет таким образом, что его верхняя плоскость и поверхность кремния лежат в одной плоскости.

По завершении процесса фотолитографии фоторезист не удаляется и проводится ионное внедрение бора для создания p^+ -областей, при этом маской при локальном внедрении выступают двухслойная пленка $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ и фоторезист. Толщина p^+ -слоя выбирается таким образом, чтобы часть этого слоя после термического окисления сохранилась под слоем SiO_2 . Наличие сильнолегированной p^+ -области под изолирующим слоем SiO_2 препятствует образованию под ним поверхностного инверсионного канала.

После удаления фоторезиста проводится локальное термическое окисление для получения изолирующих областей SiO_2 , перекрывающих по толщине весь эпитаксиальный слой. Пленка Si_3N_4 удаляется химическим травлением в горячей ортофосфорной кислоте.

По завершении операций по созданию изоляции формируется транзисторная структура. Вновь проводится термическое окисление и второй фотолитографией в слое фоторезиста создается рисунок базовых областей. При использовании фоторезиста в качестве маски проводится локальное ионное внедрение бора через пленку SiO_2 . Внедрение примеси через пленку SiO_2 ослабляет каналлованный пучок ионов и снижает концентрацию радиационных дефектов. Третьей фотолитографией создается рисунок контактных окон. Размер области SiO_2 , разделяющей в топологическом плане области базы и эмиттера, выбирается соответствующим минимальному зазору, который может быть получен между металлическими контактами. Четвертая фотолитография формирует рисунок n^+ -областей эмиттера и коллектора. После плазмохимического травления SiO_2 не снятый фоторезист является маской при локальном внедрении мышьяка. После удаления фоторезиста проводится отжиг при $T = 900^\circ\text{C}$, активирующий мышьяк и устраняющий радиационные дефекты.

Для получения омических контактов и электрической разводки между элементами на поверхность подложки наносится пленка

алюминия и вжигается в водороде при $T = 500^\circ\text{C}$. Пятой литографией формируется рисунок электрической разводки. Поверхность готовой микросхемы защищается пленкой SiN , получаемой в процессе плазмохимического осаждения при температуре 400°C .

8.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОСХЕМ НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

На основе МОП-транзисторов разработаны и изготавливаются в промышленном производстве микросхемы очень широкого класса. В основе их разнообразия лежит различие в структурах основного элемента, способах изоляции элементов, степени интеграции схем, структуре подложки.

Ниже рассмотрены типовые технологические процессы изготовления различных вариантов МОП-микросхем и их модификации.

Технологический процесс изготовления p -канального МОП-транзистора с самосовмещенным поликремниевым затвором. В наиболее общем виде структура p -канального МОП-транзистора представлена на рис. 8.13. Такие транзисторы принято называть диффузионными полевыми транзисторами с изолированным затвором и индуцированным каналом p -типа. Области истока и стока p -типа получены вскрытием окон в пленке SiO_2 (первая фотолитография) и диффузионным введением бора в кремниевую подложку n -типа. Проведением второй фотолитографии снимается толстый ($0,4 \dots 0,5$ мкм) маскирующий и защитный слой SiO_2 в области затвора и выращивается тонкий подзатворный — толщиной $0,05 \dots 0,1$ мкм. Третьей фотолитографией вскрываются контактные области и после металлизации поверхности формируются затвор и контактные площадки (четвертая фотолитография).

Этот достаточно простой технологический процесс имеет существенный недостаток. Поскольку процессы фотолитографии не обеспечивают абсолютного совмещения рисунков, то для надежного полного перекрытия тонким слоем SiO_2 и металлом области за-

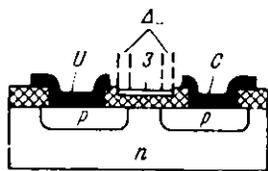


Рис. 8.13. Структура p -канального МОП-транзистора

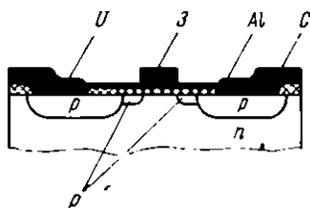


Рис. 8.14. Структура МОП-транзистора с самосовмещенным затвором

твора (по всему реальному расстоянию между диффузионными областями истока и стока) толстый слой SiO_2 удаляется, а тонкий наращивается в области, перекрывающей по своим геометрическим размерам реальную подзатворную область. Области перекрытия обозначены на рис. 8.13 величиной z . Наличие областей перекрытия ΔL со структурой металл—топкий окисел—область истока (стока) приводит к появлению значительных (до 0,1 нФ) емкостей перекрытия.

Существенно снизить емкости перекрытия в МОП-транзисторах позволяет технология, основанная на сочетании процессов диффузии и ионного легирования при создании областей истока и стока. Такая технология позволяет получить МОП-транзистор с самосовмещенным затвором, структура которого представлена на рис. 8.14. Последовательность технологических операций дана на рис. 8.15.

Химическая обработка исходных пластины проводится в соответствии с рассмотренным в гл. 2 типовым процессом. Методом термического окисления выращивается маскирующая пленка SiO_2 толщиной 0,6 мкм. В процессе первой фотолитографии создается маска для получения областей истока и стока путем локальной диффузии. В качестве источника диффузанта используется VBBr_3 .

При проведении второй фотолитографии вскрывается окно в пленке SiO_2 в области затвора. Термическим окислением в этой области создается подзатворный диэлектрик—пленка SiO_2 толщиной 0,05 ... 0,1 мкм. Непосредственно после получения подзатворного окисла на пластину наносится пленка поликремния методом осаждения из парогазовой смеси (§ 6.4) с одновременным легированием поликремния фосфором с целью повышения проводимости. На поверхность поликремния осаждается маскирующий окисел SiO_2 из парогазовой смеси при пониженном давлении. В процессе третьей фотолитографии в маскирующем SiO_2 создается рисунок поликремниевого затвора. Формирование самого затвора производится плазменнохимическим травлением поликремния в хлорсодержащей плазме (Cl_2 или $\text{Cl}_2 + \text{Ar}$) на участках, не защищенных маской из SiO_2 . Особенностью МОП-структуры является неполное перекрытие канала на данном этапе ее формирования.

Ионным легированием создаются локальные дополнительные области p -типа. Маской при локальном внедрении бора являются поликремний в области затвора и толстая пленка SiO_2 на остальной поверхности подложки. Следует учитывать, что маскирующая способность поликремния изменяется в зависимости от величины кристаллических зерен. Размер зерен определяется методом получения поликремния и концентрацией введенных в него примесей. При энергии ионов бора до 100 кэВ пленки поликремния и SiO_2 толщиной соответственно 0,4 и 0,6 мкм защищают от проникновения

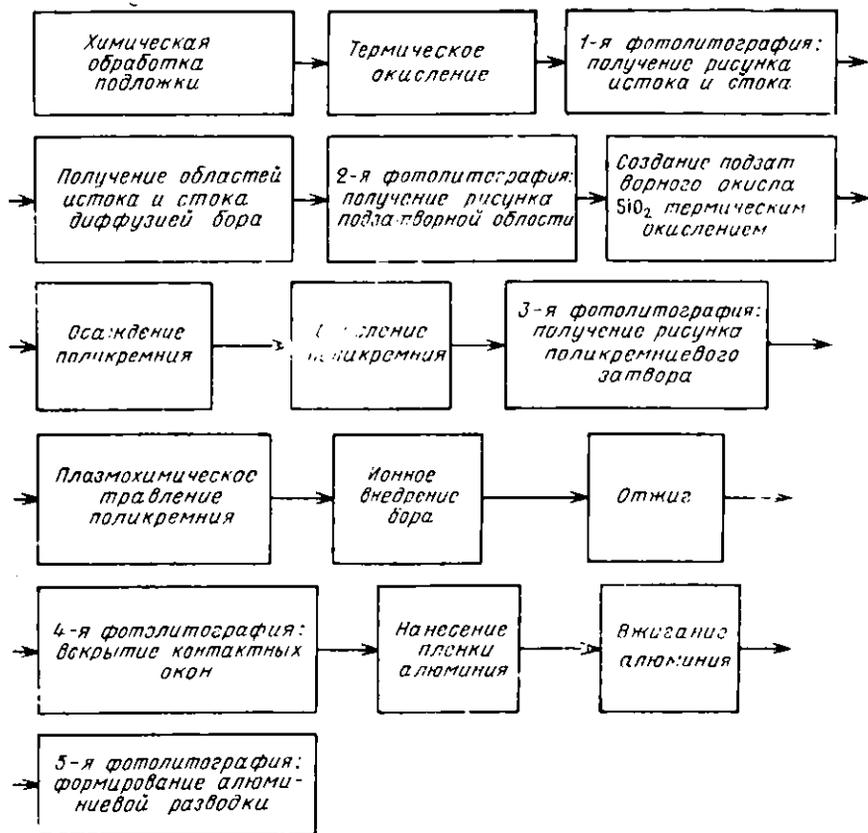


Рис. 815. Схема технологического процесса изготовления МОП-транзистора

бора в кремний. При этом тонкая подзатворная пленка SiO_2 не является маской при внедрении бора. Для активации внедренного бора и снижения структурных дефектов проводится отжиг пластин при температуре 900°C .

Для создания омических контактов к областям истока и стока в процессе четвертой фотолитографии проводится вскрытие контактных окон. При этом вскрывается окно и для контакта к поликремниевому затвору. Нанесением пленки алюминия толщиной $0,8 \text{ мкм}$ с отжигом в водороде при $T=500^\circ\text{C}$ и пятой фотолитографией формируется алюминиевая разводка.

Технологический процесс n -канальных МОП-микросхем. Процесс рассмотрен на примере создания логического элемента 1—НЕ, электрическая схема и топология которого представлены

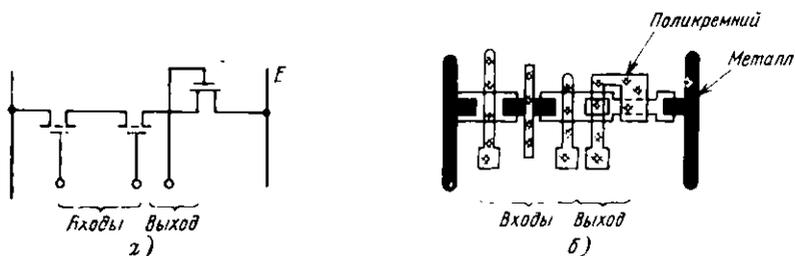


Рис. 8.16. Логический элемент И—НЕ:
 а) электрическая схема, б) топология

на рис. 8.16,а,б. Схема содержит три *n*-канальных МОП-транзистора: два — с индуцированным каналом и один — со встроенным. Последовательность технологических операций показана на рис. 8.17 и на рис. 8.18.

Первая группа технологических операций направлена на создание на поверхности подложки изолирующего слоя SiO_2 , разделяющего три локальные области, где в дальнейшем будут получены входящие в микросхему МОП-транзисторы. Толщина изолирующего оксида 0,1 ... 0,5 мкм.

На пеходной пластине кремния *p*-типа ориентации (100) и удельного сопротивления 10 ... 20 Ом·см после химической обработки создается двухслойная пленка термического оксида SiO_2 и нитрида кремния Si_3N_4 . Нитрид кремния служит маской при локальном окислении кремния с целью получения изолирующего оксида SiO_2 . Его выбор обусловлен низкой скоростью окисления, благодаря чему расположенные под ним области кремния оказываются защищенными от проникновения кислорода. Толщина маскирующей пленки Si_3N_4 — 0,1 мкм.

Пленка SiO_2 является буферным слоем, обеспечивая, во-первых, контролируемое вскрытие окон в пленке Si_3N_4 и, во-вторых, подавление механических напряжений в Si. Необходимость буферного слоя объясняется следующим образом. Для удаления пленки Si_3N_4 в местах изолирующих областей при первой фотолитографии используется метод плазмохимического травления (§ 6.8). При плазмохимическом травлении важно локально стравить защитную маску Si_3N_4 , исключив подтравливание кремниевой подложки. Для травления обычно используется фторсодержащая плазма. Поскольку во фторсодержащей плазме ($\text{CF}_4 + \text{O}_2$) скорость травления чистого кремния мало отличается от скорости травления Si_3N_4 (селективность травления нитрида кремния относительно кремния, равная отношению их скоростей травления $v_{\text{ч}}/v_{\text{к}} \approx 1:8$), наличие пленки SiO_2 контролирует вскрытие окон

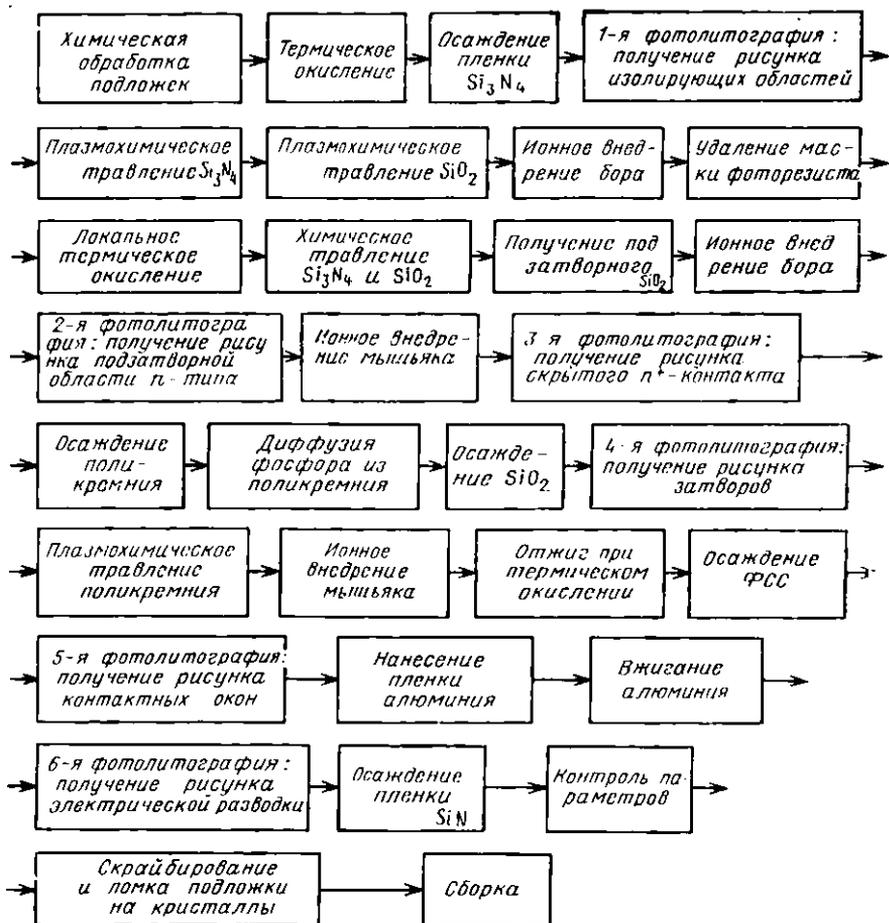


Рис. 8.17. Последовательность технологических операций получения логического элемента II—III на основе *n*-канальных МОП-транзисторов

защитной маске Si_3N_4 . Эта же плазма обеспечивает достаточную селективность травления Si_3N_4 относительно двуокиси кремния, что предотвращает полное стравливание пленки SiO_2 . Для стравливания самой пленки SiO_2 используется плазма с рабочим газом $\text{CF}_4 + \text{H}_2$, обеспечивающим высокую селективность травления SiO_2 относительно кремния ($v_{\text{кр}}/v_{\text{д}} \approx 20$).

Пленка Si_3N_4 создается методом осаждения из парогазовой смеси при атмосферном давлении в результате реакции дихлор-

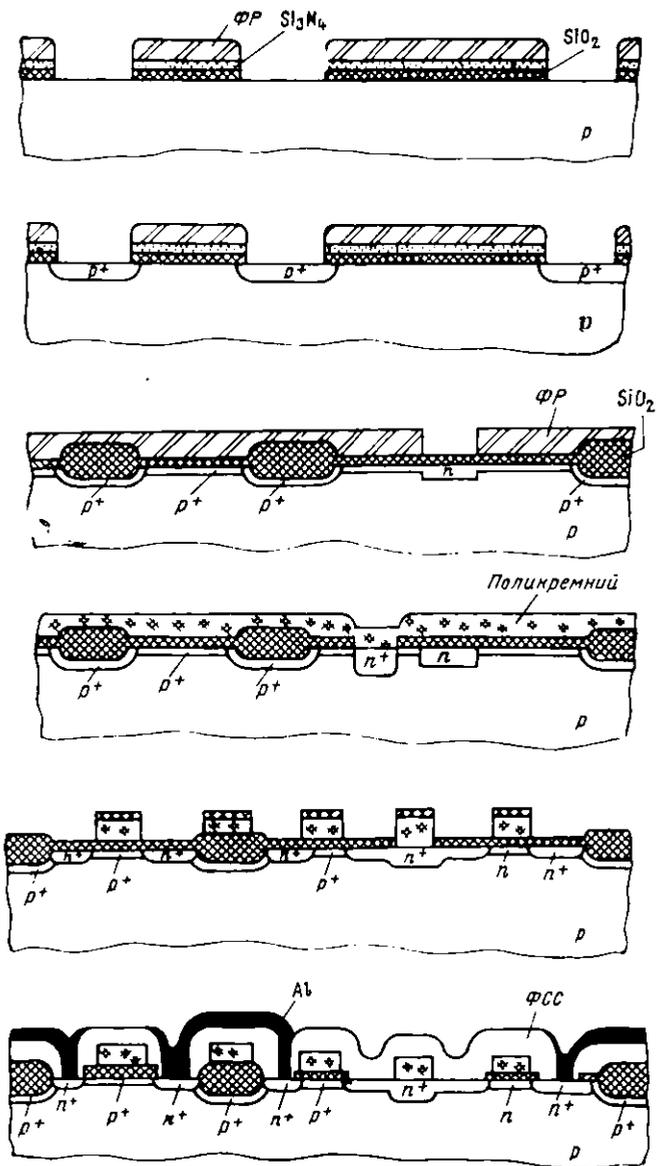


Рис. 8.18. Структура логического элемента на различных этапах изготовления

силана (или моносилана) с аммиаком при $T=800^\circ\text{C}$ (см. § 6.6). Перед операцией получения изолирующего оксида SiO_2 (толщина десятки нанометров) области локального окисления предварительно легируют бором, в результате локально окисляется не высокоомный кремний, а сильно легированные p^+ -области. Это позволяет ограничить n -каналы, возникающие за счет положительного заряда в SiO_2 , а также возможного перераспределения примеси на границе раздела фаз $\text{Si}-\text{SiO}_2$ при термическом окислении. Для создания p^- -областей используется метод поющего внедрения примеси. Двухслойная пленка $\text{SiO}_2\text{---Si}_3\text{N}_4$, покрытая фоторезистом, создает маску при поющем внедрении бора.

После получения изолирующего оксида SiO_2 термическим окислением защитные пленки нитрида кремния и подслоя SiO_2 удаляются химическим травлением. Для травления Si_3N_4 может использоваться нагретая ортофосфорная кислота, для SiO_2 - буферный травитель.

Следующая группа технологических операций направлена на формирование МОП-транзисторных структур. На поверхности подложки формируется подзатворный окисел SiO_2 . Затем проводятся две операции поного легирования для образования: (1) на всей поверхности подложки p^- -слоя внедрением бора, (2) локального n -слоя в подзатворной области МОП-транзистора со встроенным каналом внедрением мышьяка. Эти слои предназначены для получения заданного порогового напряжения МОП-транзисторов. Кроме того, p^- -слой в области затвора предотвращает прокол между стоком и истоком при малой длине канала. Бор внедряется через пленку подзатворного диэлектрика. При образовании локальной области n -типа проводится вторая фотолитография, в процессе которой создается маска фоторезиста, закрывающая области транзисторов с индуцированными каналами от проникновения мышьяка.

Третья фотолитография проводится с целью получения рисунка скрытого контакта n^- -типа, который создается для обеспечения электрического соединения между поликремниевым затвором МОП-транзистора со встроенным каналом и истоком МОП-транзистора с индуцированным каналом. С поверхности контактной n^- -области стравливается подзатворный диэлектрик SiO_2 . Для получения контакта осаждают поликремний из парогазовой смеси, одновременно легируя его фосфором (см. § 6.6), после чего проводится процесс диффузии фосфора из поликремния. Далее осаждают маскирующий окисел SiO_2 из парогазовой смеси при пониженном давлении (§ 6.6) толщиной 0,1 мкм и проводят четвертую фотолитографию для получения рисунка затворов. Поликремний травят в хлорсодержащей плазме. Может использоваться либо чистый хлор, либо в смеси с аргоном. В такой плазме

селективность травления по отношению к SiO_2 высокая, что обеспечивает высокие маскирующие свойства при локальном травлении поликремния, а также защитность пленки подзатворного диэлектрика, которая вскрывается в конце травления.

Для создания областей стоков и истоков применяют полное внедрение мышьяка. При этом образуется электрический контакт сток транзистора с индуцированным каналом исток и затвор транзистора со встроенным каналом. В последующем отжиге в окислительной атмосфере происходит отжиг радиационных дефектов, разгонка мышьяка и дополнительное (повторное) окисление областей стоков, истоков и поликремневых затворов. Этот дополнительный окисел предохраняет от проникновения фосфора в области стоков и истоков из фосфоросиликатного стекла (ФСС), которое наносится на поверхность всей подложки в следующей операции.

Цель осаждения легированной фосфором пленки SiO_2 — выравнивание поверхностного рельефа (планаризация поверхности) для получения качественной (без разрывов) алюминиевой разводки. Одновременно эта пленка является межслойным диэлектриком, поскольку рассматриваемая схема имеет два уровня металлической разводки — нижний уровень из поликремния и верхний из алюминия. Пленку фосфоросиликатного стекла толщиной 0,35 мкм получают осаждением из парогазовой смеси при пониженном давлении. Для сглаживания рельефа стекло оплавливают. Кроме того, фосфоросиликатное стекло защищает нижележащие слои структуры от возможного проникновения подвижных ионов натрия, способных дестабилизировать электрические характеристики схемы.

При пятой фотолитографии вскрываются окна в фосфоросиликатном стекле и термическом SiO_2 в областях стока и истока и в местах соединения алюминиевой разводки с поликремнием. Для вскрытия окон используются процессы травления в плазме $\text{CF}_4 + \text{H}_2$. На поверхность подложки наносится, а затем вжигается при $T = 500^\circ\text{C}$ в водороде пленка алюминия толщиной 0,7 мкм.

Шестая фотолитография формирует алюминиевые токоведущие дорожки. Для плазмохимического травления Al используется хлорсодержащая плазма, например, на основе CCl_4 , BCl_3 , SiCl_4 или смесей этих паров с Cl_2 . Поверхность алюминия обычно покрыта слоем естественного Al_2O_3 толщиной около 3 нм. Этот слой Al_2O_3 препятствует реакции Al с Cl и Cl_2 в плазме с образованием летучего соединения AlCl_3 . Для удаления естественного Al_2O_3 в плазму вводятся BCl_3 или CCl_4 . В плазме, используемой для травления Al, скорость травления SiO_2 достаточно низка. Поэтому контролируемость процесса травления Al на поверхности SiO_2 удовлетворительна.

Полностью сформированная структура покрывается пленкой нитрида кремния Si_3N_4 , которая образуется в низкотемпературном (100 ... 400 °С) процессе плазмохимического осаждения.

8.5. ПОЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РАЗВОДКИ И СБОРКА КРЕМНИЕВЫХ МИКРОСХЕМ

Материалы для электрической разводки. Металлизация поверхности кремниевых подложек с целью дальнейшего формирования межэлементной электрической разводки проводится на завершающих этапах создания микросхем. Основные требования к материалам, которые используются для электрической разводки в кремниевых микросхемах, состоят в следующем: низкое электрическое сопротивление в тонких пленках; низкое переходное сопротивление омического контакта к кремнию; хорошая адгезия к кремнию и слою SiO_2 ; химическая инертность; способность к сварке или пайке.

Этим требованиям достаточно полно удовлетворяет алюминий. Для получения пленок алюминия можно использовать наиболее простой метод — вакуумное термическое напыление. К недостаткам пленок алюминия относятся низкая стойкость к механическим повреждениям, более резко выраженная по сравнению с другими материалами электродиффузия, наличие на их поверхности пленки Al_2O_3 , высокая степень проникновения кремния в алюминий при сравнительно низких температурах. Эти недостатки, которыми обычно пренебрегают при изготовлении микросхем малой степени интеграции, начинают играть все более значительную роль в БИС и СБИС.

При уменьшении размеров элементов уменьшается и ширина токоведущих участков микросхемы (омических контактов, межэлементных соединений, затворов МОП-транзисторов). Увеличивается влияние поверхностного сопротивления токоведущих дорожек на время задержки микросхемы. При формировании узких (ширина 1 ... 2 мкм) токоведущих дорожек из алюминия проблема получения бездефектных и надежных межсоединений связана с явлением электродиффузии. Электродиффузия представляет собой массоперенос проводящего материала. Он связан с повышенной и направленной подвижностью атомов проводящего материала к положительному электроду, обусловленной столкновениями электронов с атомами и передачей им количества движения. В результате такой подвижки атомов изменяется форма токоведущей дорожки на участках с повышенной плотностью тока: в ней могут образовываться поры или разрывы и бугорки. Металлические слои

в микросхемах наносятся обычно на рельефную поверхность. Ступеньки рельефа — это те участки, на которых наиболее вероятно образование разрывов в металлических дорожках как вследствие электродиффузии, так и из-за механических напряжений, обусловленных различием в коэффициентах линейного расширения кремния и металла разводки.

При переходе к БИС и СБИС уменьшается толщина легированных слоев, формирующих транзисторные структуры. Из-за того, что при сравнительно низких температурах вжигания алюминия ($450 \dots 500^\circ\text{C}$) происходят процессы взаимного перемещения атомов кремния в алюминий и атомов алюминия в кремний могут возникнуть дефекты двух типов: короткое замыкание *p-n* перехода; рекристаллизация избыточного кремния в легированном кремнии алюминии. Последний выпадает в виде преципитатов на поверхность контактной области. Поскольку преципитаты содержат алюминий, то может образоваться вместо омического выпрямляющий контакт с кремнием *n*-типа. Преодолеть эти дефекты можно, используя для разводки не чистый алюминий, а его сплав с кремнием.

В силу рассмотренных недостатков алюминиевых пленок разрабатываются технологические варианты электрической разводки с использованием других материалов. Однако поскольку ни один из элементарных металлов, кроме алюминия, не обеспечивает одновременно хорошие проводимость, адгезию, омический контакт и химическую стойкость, то это могут быть либо химические соединения, либо многослойные композиции проводящих материалов. Наряду с алюминием широко используется для получения электрической разводки поликремний, обычно легированный доменной примесью для снижения поверхностного сопротивления. Поликремний — наиболее оптимальный материал для затворов в МОП-микросхемах. Однако его удельное сопротивление существенно выше чем у алюминия ($\text{Al} — 2,7 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$, поликремний — $1000 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$). Поэтому обычно поликремний используется в сочетании с алюминиевой разводкой.

Вместо Al с поликремниевыми затворами могут применяться силициды — соединения кремния с различными металлами. Силициды многих металлов имеют достаточно низкие удельные сопротивления (обычно нескольких десятков $\text{мкОм}\cdot\text{см}$). При выборе силицидов исходят из перечисленных общих требований к материалам для электрической разводки. В наибольшей мере удовлетворяют этим требованиям силициды вольфрама WSi_2 , молибдена MoSi_2 , титана TiSi_2 и тантала TaSi_2 . В основе одного из вариантов электрической разводки лежит сочетание силицида в контактном окне с многослойной металлической композицией на поверхности SiO_2 , например с композицией Ti—Pt—Au .

Силицид для омического контакта может быть получен напылением пленки соответствующего металла на поверхность подложки, при этом в области вскрытых окон металл непосредственно контактирует с Si. В результате реакции между кремнием и металлом при термической обработке образуется силицид. С остальной поверхностью подложки, покрытой SiO₂, металл стравливается. Этот технологически простой способ получения силицида может оказаться неприемлемым для мелко залегających *p-n* переходов, поскольку для образования силицида может потребоваться слой кремния такой толщины, которая превысит глубину залегания *p-n* перехода. Поэтому при формировании контактов следует учитывать количество кремния, потребляемого металлической пленкой. В табл. 8.1 представлены расчетные данные по

Таблица 8.1. Расход кремния для образования силицидов, мкм

| Силициды металлов | TiSi ₂ | MoSi ₂ | WSi ₂ | TaSi ₂ |
|--|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Толщина слоя кремния, вступающего в химическую реакцию на 0,1 мкм металла, мкм | 0,227 | 0,256 | 0,253 | 0,221 |

расходу кремния (в толщине слоя, вступающего в химическую реакцию) на образование силицида из пленки металла толщиной 0,1 мкм.

Необходимость использования трехслойной композиции для получения разводки на SiO₂ связана с тем, что хорошо проводящие металлы в виде однослойной пленки не могут быть использованы в качестве материала электрической разводки. Благородные металлы не используются из-за крайне плохой адгезии к диэлектрическим пленкам и, в частности, к SiO₂. Медь не используется из-за высокой химической активности. В силу этого, в частности, при использовании золота необходимо наносить подслои. Для подслоя можно использовать титан, обеспечивающий хорошую адгезию к SiO₂. Поскольку Au с Ti может образовывать плохое проводящее соединение, между ними создается прослойка из Pt.

Многоуровневая электрическая разводка. Функциональная сложность БИС и СБИС затрудняет решение задач, связанных с созданием соединений между элементами. Система соединений, исключая многократные взаимные пересечения проводников, в таких микросхемах, как правило, не может быть реализована. Поэтому приходится использовать многоуровневую металлическую разводку. Число уровней определяется логической структурой

БИС или СБИС и их функциональной сложностью. Наиболее сложные микросхемы имеют до четырех уровней соединений. Схематично двухуровневая разводка для биполярной микросхемы представлена на рис. 8.19.

Технологические задачи по изготовлению многоуровневой разводки можно разделить на три группы: получение межуровневого изолирующего слоя; получение контактных окон в этом слое; получение металлической разводки в каждом слое и надежных низкоомных контактов между проводниками разных слоев.

Указанные технологические процессы в той или иной мере используются и при изготовлении простых микросхем. Однако при получении многоуровневой разводки к этим процессам предъявляются дополнительные требования. При многоуровневой разводке усиливается отрицательное влияние электродиффузии. Если разрывы равно недопустимы как для одноуровневой, так и для многоуровневой разводки, то выступы (а они могут быть для Al довольно острыми) приводят к дополнительным дефектам микросхемы именно в последнем случае, поскольку могут нарушать сплошность межуровневого диэлектрического слоя и способствовать возникновению коротких замыканий между проводниками разных уровней. Окисление поверхности металлических слоев в процессах их химической и термической обработки усложняет процесс получения низкоомного контакта между тонкими металлическими слоями. Поэтому использование алюминия из-за наличия на поверхности окисла Al_2O_3 при многоуровневой разводке в БИС и СБИС неэффективно.

Увеличение числа уровней разводки приводит, естественно, к увеличению количества ступенек и к повышению вероятности разрывов проводников. Поэтому планаризация поверхности подложки повышает выход годных микросхем.

Процесс вскрытия контактных окон в диэлектрических слоях при многоуровневой разводке также имеет свои особенности. В БИС и СБИС снижается ширина проводников и размеры контактных окон, а толщина межуровневого диэлектрика возрастает по сравнению с защитным слоем SiO_2 . Толщину диэлектрика целесообразно увеличить для снижения паразитных емкостей типа металл - диэлектрик - металл (МДМ) в местах пересечений проводников. Это усложняет получение контактных окон заданных размеров и формы.

Примером двухуровневой разводки является уже рассмотренная выше разводка в *n*-канальных МОП-микросхемах на основе поликремния и алюминия. В более общем варианте и для многоуровневой разводки используется композиция сплавов — титан — платина — золото.

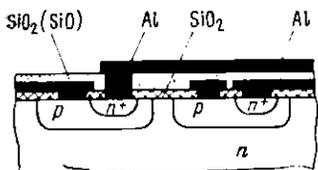


Рис. 8.19. Двухуровневая разводка в интегральных микросхемах

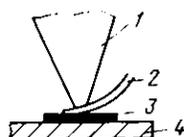


Рис. 8.20. Присоединение вывода методом термокомпрессии клиновидным инструментом:
1 — игла; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — основание

Сборка кремниевых микросхем. Процесс сборки сводится к закреплению кристалла кремния на основании корпуса, присоединению выводов к контактным площадкам на кристалле и внешним выводам корпуса и к герметизации корпуса.

Для полупроводниковых микросхем используются в основном четыре типа корпусов: металлостеклянные корпуса круглой формы с выводами, лежащими вне плоскости основания корпуса; металлостеклянные плоские корпуса прямоугольной формы; металлокерамические плоские корпуса; пластмассовые корпуса.

Для крепления кремниевых кристаллов на основании корпуса наиболее широкое распространение получил метод пайки эвтектическим сплавом золота с кремнием (температура плавления 370 °С). Такой сплав образуется в месте соприкосновения кремния с золотым покрытием основания корпуса благодаря взаимной диффузии золота и кремния.

Для крепления кремниевых кристаллов на керамические основания корпусов применяется метод приклеивания эпоксидными смолами, обладающими близкими к кремнию коэффициентами линейного расширения.

Для присоединения выводов к контактным площадкам кремниевых микросхем и внешним выводам корпуса прибора используется метод термокомпрессионной сварки. Метод состоит в присоединении выводов в виде тонких металлических проволочек (диаметр 10 ... 30 мкм) к контактным площадкам при одновременном воздействии повышенной температуры и давления. При этом соединение металлов происходит при температурах, более низких, чем температуры плавления соединяемых металлов или их эвтектического сплава. Для изготовления проволоки применяются пластичные металлы, обычно алюминий и золото.

Присоединяемая проволока совмещается с контактной площадкой на кристалле, к месту соединения подводится, а затем опускается инструмент в виде иглы (рис. 8.20). Сварка происходит

при давлении иглы на кристалл, расположенный на нагретом основании. Затем проволока присоединяется к внешнему выводу корпуса и отрезается.

Для создания термокомпрессионных соединений используются следующие режимы: температура кристалла 300 ... 400 °С, давление инструмента может выбираться в широком интервале, приблизительно от 10^7 до 10^8 Па в зависимости от температуры и диаметра проволоки.

Правильный выбор температуры и давления является основой для получения надежных соединений. Слишком большая (более 60%) деформация проволоки может привести к ее разрыву. Еще одной причиной ненадежности термокомпрессионных соединений может служить образование хрупких химических веществ типа $AuAl_2$ и Au_2Al при термокомпрессии золота и алюминия. Такое сочетание материалов широко применяется в полупроводниковых микросхемах, где контактные площадки выполняются из алюминия, а внешние выводы корпуса покрыты золотом.

Герметизация корпусов осуществляется сваркой (или пайкой) основания корпуса с крышкой.

Глава 9. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

9.1. ВВЕДЕНИЕ

В пленочных интегральных микросхемах элементы создаются осаждением тонких пленок на диэлектрические подложки. Подложка служит механическим основанием интегральной схемы и, будучи диэлектриком, изолирует ее элементы.

По тонкопленочной технологии в настоящее время изготавливаются только пассивные элементы (в основном, резисторы и конденсаторы) микросхем. Дополненные активными элементами (диодами, транзисторами, полупроводниковыми ИМС) пленочные микросхемы принято называть гибридными. Активные элементы в них укрепляются на подложке методом навесного монтажа. Пассивные и активные элементы гибридных микросхем создаются в двух независимых друг от друга циклах, что обеспечивает им следующие преимущества:

простота изготовления, малая трудоемкость, непродолжительность производственного цикла, низкая стоимость. Использование в качестве активных элементов полупроводниковых микросхем и многоуровневого расположения пассивных элементов расширяет схемотехнические возможности при создании больших гибридных интегральных микросхем.

Технология тонких пленок позволяет создавать прецизионные резисторы и конденсаторы, поэтому гибридная технология предпочтительнее в схемах с повышенной точностью пассивных элементов. Интегральные микросхемы СВЧ диапазона также могут создаваться по гибридной технологии.

9.2. МАТЕРИАЛЫ ПОДЛОЖЕК

Размеры подложек выбираются в соответствии со степенью интеграции микросхем. Что касается материалов, то их выбор определяется влиянием их свойств на параметры и характеристики печатных элементов и подложек.

Материал подложек должен иметь высокие объемное и поверхностное удельные сопротивления. Это требование вытекает из необходимости обеспечения электрической развязки между элементами. Диэлектрические потери должны быть низкими, поскольку это снижает потери энергии вследствие поглощения в диэлектрике. Высокая теплопроводность подложек обеспечивает отвод тепла от микросхемы и выравнивание температурного градиента по ее поверхности. Согласование коэффициентов линейного расширения подложки и осаждаемых пленок уменьшает механические напряжения в пленках и тем самым снижает вероятность появления в них микротрещин, разрывов и т. п. Высокая механическая прочность подложек облегчает их механическую обработку для получения требуемой формы и размеров и создания в них отверстий, а также предупреждает поломку подложек в процессе сборки микросхем. Подложки должны быть достаточно герметичными при операциях пайки и сварки. Материал подложки и структура поверхности должны обеспечивать хорошую адгезию осаждаемых пленок к подложке.

В табл. 9.1 приведены характеристики диэлектрических материалов, которые в большей или меньшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подложкам для гонконденсных микросхем. Ниже приводятся данные по составу рассмотренных материалов.

Стекла представляют собой различные системы оксидов. Боросиликатное стекло состоит из SiO_2 (80%), B_2O_3 (12%) и ряда других оксидов (Na_2O , K_2O , Al_2O_3). Алюмосиликатное стекло состоит из SiO_2 (60%), Al_2O_3 (20%) и других оксидов (Na_2O , CaO , MgO , B_2O_3).

Керамика -- поликристаллическое вещество с зернами сложной структуры, получаемое в результате высокотемпературного

Таблица 9.1. Характеристики подложек

| Тип диэлектрического материала | Удельное сопротивление, Ом·см | Относительная диэлектрическая проницаемость | Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц | Теплопроводность, кал·см·с ⁻¹ ·°С | Коэффициент линейного расширения $10^{-6}/°С$ |
|---|-------------------------------|---|--|--|---|
| Боросиликатное стекло | 10^7 | 4,6 | $6,2 \cdot 10^{-3}$ | 0,0027 | 3,25 |
| Алюмооксидная керамика типа «Полнкор» | 10^{14} | 10,8 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,075...0,08 | 7,5...7,8 |
| Алюмооксидная керамика (96% Al_2O_3) | 10^{14} | 9,1 | $2,7 \cdot 10^{-3}$ | 0,03...0,06 | 6,4 |
| Бериллиевая керамика | 10^{16} | 6,6 | $3 \cdot 10^{-4}$ | 0,25...0,5 | 7—9 |
| Кварцевое стекло | 10^{16} | 4 | $3,8 \cdot 10^{-4}$... $2 \cdot 10^{-5}$ | 0,0036 | 0,56...0,6 |
| Сигаллы | 10^{13} ... 10^{14} | 6,5 | 10^{-3} ... $6 \cdot 10^{-3}$ | 0,005...0,009 | 5 |
| Сапфир | — | 8,6 | $2 \cdot 10^{-4}$ | 0,065 | 5 |

отжига (спекания) порошков различных оксидов. Алюмооксидная керамика типа «Полнкор» состоит из Al_2O_3 (99,8%), B_2O_3 (0,1%), MgO (0,1%). Размер зерен менее 40 мкм. Бериллиевая керамика содержит BeO от 98 до 99,5%.

Сигаллы — стеклокерамические материалы, получаемые в результате термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство сигаллов характеризуются следующим составом оксидов: 1) Li_2O — Al_2O_3 — SiO_2 — TiO_2 ; 2) RO — Al_2O_3 — SiO_2 — TiO_2 (RO — один из оксидов CaO , MgO или BaO).

Сапфир — чистый монокристаллический Al_2O_3 α -модификации.

Сравнительный анализ этих материалов позволяет сделать следующие выводы. Стекла имеют недостаточную прочность, недостаточную химическую стойкость, для них характерно сильное газовыделение при нагреве. Из-за содержания оксидов щелочных металлов в них возможно образование ионов этих металлов, обладающих повышенной миграцией при приложении электрического поля и обуславливающих нестабильность свойств подложек и элементов микросхем. Стекла имеют низкую теплопроводность.

Керамика, особенно бериллиевая, по сравнению со стеклами, имеет значительно большую теплопроводность и механическую прочность, лучшую химическую стабильность. Большие размеры зерен керамических материалов не позволяют получить удовлетворительный микрорельеф поверхности для тонкопленочных ми-

кросхем. Керамика широко используется для подложек толсто- пленочных микросхем. Наиболее удовлетворительным микрорельефом обладает керамика с 96%-ным содержанием Al_2O_3 .

Ситаллы в 2...3 раза превосходят стекла по механической прочности. Они хорошо прессуются, вытягиваются, прокатываются. По диэлектрическим свойствам ситаллы превосходят стекла и практически не уступают керамике. Из-за многофазной структуры в процессах химической обработки пленок может наблюдаться достаточно глубокое селективное травление ситалловых подложек. Поэтому иногда поверхность ситалла покрывают слоем однородного материала толщиной в несколько микрометров, например оксидом кремния SiO_2 .

Сапфир характеризуется хорошими диэлектрическими свойствами, однако имеет более высокую стоимость по сравнению с ситаллами. При работе с сапфиром необходимо учитывать его резко выраженную анизотропию.

По совокупности диэлектрических и механических свойств, микрорельефу поверхности, стойкости к химическому воздействию наиболее приемлемыми материалами подложек для тонкопленочных микросхем являются ситаллы, для толстопленочных - 96%-ная алюмооксидная керамика.

9.3. МАТЕРИАЛЫ ПЛЕНОК В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Основными элементами тонкопленочных микросхем являются резисторы и конденсаторы. Тонкопленочные индуктивности практически не применяются из-за сложности их изготовления.

Материалы тонкопленочных резисторов. К ним, в первую очередь, предъявляются определенные требования по поверхностному сопротивлению. Наибольшее распространение имеют резисторы с сопротивлениями от 10 Ом до 10 МОм. Лицевые размеры резисторов приходится ограничивать: максимальную длину из-за ограниченности размеров подложек, а минимальные длину и ширину -- из соображений допустимого разброса. Если ограничить ширину и минимальную длину резистора размером 0,1 мм, а максимальную длину -- размером 10 мм, то диапазон необходимых поверхностных сопротивлений слоя составит 10... 10⁷ Ом/□. Получение пленок с поверхностными сопротивлениями слоя более 10⁵ Ом/□ представляет собой сложную еще не решенную задачу.

Помимо требований к удельному сопротивлению предъявляются определенные требования и к его стабильности. Кроме того, резистивные пленки должны характеризоваться низким температурным коэффициентом сопротивления ТКС (менее 10⁻¹ 1/°С).

Материалы, используемые для тонкопленочных резисторов, можно разделить на три группы: металлы; металлические сплавы; металлодиэлектрические смеси-керметы.

Удельное сопротивление массивных металлов не превышает 20... 50 мкОм·см даже для таких слабопроводящих материалов, как титан, гафний, цирконий, хром, тантал. Однако при осаждении в виде тонких пленок удельное сопротивление металлов может значительно увеличиваться. Наиболее существенный вклад в повышение удельного сопротивления вносятся дефектами структуры и примесями. Учитывая это, в процессе осаждения некоторых металлических пленок намеренно создаются условия для газопоглощения.

Наиболее широкое распространение для изготовления металлических резисторов имеют хром и тантал. Большой интерес к танталу как материалу для тонкопленочных резисторов обусловлен его способностью легко окисляться при химическом анодировании. Частично окисляя пленку тантала, можно тем самым уменьшать толщину резистивного слоя и одновременно обеспечивать защиту поверхности резистора. Кроме того, установлено, что танталовые пленки при введении в них ряда примесей приобретают высокое поверхностное сопротивление слоя при низком температурном коэффициенте. Особенно хорошие результаты в качестве примеси дает азот.

Тонкие пленки полупроводниковых материалов не используются для изготовления резисторов в силу большого отрицательного температурного коэффициента сопротивления.

Помимо металлов для изготовления резисторов широко используются металлические сплавы, обладающие более высоким удельным сопротивлением даже в объемных образцах. К таким сплавам, в первую очередь, относятся сплав никеля и хрома — нихром с удельным сопротивлением около 100 мкОм·см, а также нихром с добавками других материалов, например сплав никеля (74%), хрома (20%), железа (3%) и алюминия (3%) с удельным сопротивлением около 130 мкОм·см. Так же как и металлы, эти сплавы, полученные в виде тонких пленок, имеют более высокие удельные сопротивления, чем массивные образцы.

Керметы представляют собой металлodieлектрические смеси. Созданию таких материалов и их широкому использованию для получения резисторов способствовали положительные результаты, полученные при окислении, азотировании и других методах введения примесей в металлические пленки при их отжигах. Намеренное изготовление смесей металлов и диэлектриков позволило получить наиболее высокие значения удельных сопротивлений. Удельное сопротивление пленок керметов в большой степени зависит от их состава. Поэтому точное воспроизведение состава кермета в пленке играет исключительно важную роль. Обычно для напыления применяют метод взрывного испарения (см. гл. 6).

Изучено большое число комбинаций металл — диэлектрик: Cr—SiO₂, Al—SiO₂, Pt—Ta₂O₅ и др. Наилучшие результаты получены для комбинации Cr—SiO₂.

Свойства наиболее распространенных материалов и резисторов на их основе сведены в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Свойства материалов, применяемых для тонкопленочных резисторов

| Материал резистивной пленки | Удельное сопротивление слоя, Ом/1 | Температурный коэффициент сопротивления ТКС, 10 ⁴ 1/С |
|--|-----------------------------------|--|
| Хром | 50...500* | ±1 |
| Таитал | 10...300* | -2 |
| Нихром (20% Cr, 80% Ni) | 300 | ±1 |
| Железохромоникелевый сплав (71,5% Fe, 21% Cr, 7,5% Ni) | 150 | -1 |
| Металлоспиннидный сплав М.ИТ-3М (Fe, Cr, W, Si) | 500 | ±2 |
| Кермер (Cr—SiO) | 3000...10 000* | -4 |

* Удельное сопротивление слоя зависит от технологических факторов — скорости напыления, температуры подложки и др.

Материалы для тонкопленочных конденсаторов. Тонкопленочный конденсатор имеет трехслойную структуру металл — диэлектрик — металл, расположенную на изолирующей подложке. Параметры тонкопленочного конденсатора определяются, в основном, диэлектрическим материалом. Однако следует иметь в виду, что на свойства диэлектрика могут оказывать существенное влияние металлические обкладки. Например, может уменьшаться напряжение пробоя из-за миграции атомов металла в слой диэлектрика. Металлы с хорошей адгезией иногда создают в слое диэлектрика большие напряжения. Сопротивление металлических обкладок влияет на потери энергии в конденсаторе. Поэтому при разработке конденсаторов необходимо выбирать совместно всю совокупность входящих в их структуру материалов.

К основным характеристикам диэлектрических материалов для конденсаторов относятся удельная емкость $C_{уд} = \epsilon\epsilon_0/h$ ($\epsilon\epsilon_0$ — диэлектрическая постоянная и h — толщина слоя диэлектрика) и электрическая прочность E_d .

Из-за сложности получения бездефектных пленок на большой площади максимальная площадь конденсатора ограничивается. Минимальная площадь ограничивается заданной точностью. Отсюда для обеспечения широкого диапазона номиналов емкостей предъявляют определенные требования к удельным емкостям. Поскольку существует предел и для минимальной толщины пленок (из-за влияния проколов в пленке диэлектрика на ее электрическую прочность), то при изготовлении тонкопленочных конденсаторов к диэлектрическим материалам предъявляются определенные требования по диэлектрической проница-

емкости. Если ограничить толщину пленки значением 0,1 мкм, а максимально допустимую площадь соответственно 10 мм², то для получения емкости 10⁶ пФ требуемая диэлектрическая проницаемость составит более 10.

Электрическая прочность диэлектрического материала определяет напряженную пробоя $U_d = E_d h$, а следовательно, и диапазон рабочих напряжений конденсатора.

Диэлектрические материалы должны обладать минимальной гигроскопичностью, высокой механической прочностью при циклических изменениях температуры, хорошей адгезией к подложкам.

Диэлектрические материалы, используемые для тонкопленочных конденсаторов, в основном, представляют собой оксиды полупроводников и металлов.

Из оксидов полупроводников наибольшее распространение в тонкопленочной технологии получили оксид кремния SiO и оксид германия GeO, имеющие высокую диэлектрическую проницаемость. Пленки двуокиси кремния SiO₂ существенно реже используются в тонкопленочной технологии, что отчасти связано с более низкими значениями диэлектрической проницаемости, а также с невозможностью использования для осаждения SiO₂ метода вакуумного термического испарения, поскольку давление паров SiO₂ при $T = 1600^\circ\text{C}$ приблизительно на пять порядков ниже, чем у SiO.

Наибольший интерес представляет ряд оксидов тугоплавких металлов, таких как Ta₂O₅, TiO₂, HfO₂, Nb₂O₅. Эти материалы по сравнению с другими оксидами обладают наиболее высокими значениями диэлектрической проницаемости. Технология получения этих пленок развита далеко не в равной мере. Наиболее отработана технология пленок Ta₂O₅.

Интерес к пленкам тантала и Ta₂O₅ объясняется возможностью его применения для изготовления и резисторов, и конденсаторов в одних и тех же технологических процессах: ионно-плазменного распыления и электролитического анодирования. Однако следует учитывать, что сопротивление обкладок из тантала велико по сравнению с другими материалами (например, алюминием). Поэтому конденсаторы в тонкопленочных микросхемах, изготовленных на основе тантала, характеризуются большими потерями энергии.

Свойства материалов, наиболее широко используемых для создания тонкопленочных конденсаторов, представлены в табл. 9.3.

Тонкопленочные проводники. Тонкопленочные проводники в микросхемах служат для соединения пассивных тонкопленочных элементов и создания контактных площадок для присоединения активных навесных элементов и внешних выводов. Тонкопленочные проводящие материалы должны иметь следующие свойства:

Таблица 9.3. Свойства материалов, применяемых для тонкопленочных конденсаторов

| Материал диэлектрической пленки | Относительная диэлектрическая проницаемость | Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^2 Гц | Удельная емкость, пФ/см ² | Электрическая прочность, $E \cdot 10^{-6}$ В/см | Температурный коэффициент емкости 10^4 1/°C |
|---------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|---|
| SiO | 5...6 | 0,01...0,02 | $(0,5...1) \cdot 10^4$ | 2...3 | 2 |
| GeO | 11...12 | 0,005 | $(0,5...1,5) \cdot 10^4$ | 1 | 3 |
| Ta ₂ O ₅ | 23 | 0,02 | $(0,6...2) \cdot 10^5$ | 2 | 4 |

высокую электропроводность; хорошую адгезию к подложке; способность к сварке или пайке; химическую инертность.

К материалам с высокой электрической проводимостью относятся золото, серебро, алюминий, медь. Однако пленки этих металлов не удовлетворяют всей перечисленной совокупности свойств. Например, благородные металлы имеют плохую адгезию к подложке, алюминиевые пленки плохо поддаются пайке и сварке, медь легко окисляется.

Поэтому для получения тонкопленочных проводников используются многослойные композиции. Эти композиции включают подслои толщиной $(1...3) \cdot 10^{-2}$ мкм из материала, обеспечивающего хорошую адгезию, слой из материала с высокой электропроводностью толщиной 0,4...0,8 мкм и покрытие толщиной $(5...8) \cdot 10^{-2}$ мкм из химически инертного материала с хорошей способностью к сварке или пайке. Некоторые композиции для тонкопленочных проводников представлены в табл. 9.4.

Таблица 9.4. Материалы, применяемые для тонкопленочных проводников, если в качестве подслоя используется нихром

| Материалы | | Сопротивление слоя, Ом/3 |
|-----------|------------|--------------------------|
| Слой | Покрывание | |
| Золото | - | 0,03...0,04 |
| Медь | Никель | 0,02...0,04 |
| Медь | Серебро | 0,02...0,04 |
| Алюминий | Никель | 0,1...0,2 |

9.4. ПОЛУЧЕНИЕ РИСУНКОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

Рисунки в тонких пленках можно получать двумя способами: непосредственно в процессе нанесения пленок с помощью специальных масок (трафаретов), накладываемых на подложку; час-

тичным удалением (обычно методом фотолитографии) пленки, первоначально нанесенной на всю поверхность подложки.

Получение рисунка в процессе осаждения тонких пленок можно осуществлять, используя два типа трафаретов — неконтактные и контактные.

Неконтактный трафарет в простейшем варианте представляет собой пластину из достаточно жесткой фольги, отверстия в которой соответствуют заданному рисунку. Точность воспроизведения линейных размеров рисунка при осаждении пленок через неконтактные трафареты зависит от нескольких факторов. Основной из них — образование «размытого» края рисунка вследствие отражения атомов осаждаемого вещества от боковых стенок отверстий в трафарете и неплотного прилегания трафарета к подложке. Кроме того, размытию края способствует отражение атомов от подложки и осаждение их на внутреннюю, обращенную к подложке, сторону трафарета, а затем повторное их испарение. Эти эффекты приводят к тому, что получение абсолютной погрешности линейных размеров в рисунке, меньшей чем толщина трафарета, оказывается невозможным. Уменьшение же толщины фольги ограничивается потерей жесткости.

Поэтому применяют трафареты более сложной конструкции, выполненные на основе биметаллической фольги. Биметаллические трафареты изготавливаются из фольги бериллиевой бронзы толщиной 100 ... 150 мкм, покрытой с одной стороны слоем никеля толщиной около 10 мкм. Рисунок трафарета создается слоем никеля, а бронзовая фольга, частично вытравленная, служит механическим основанием. На рис. 9.1 представлен биметаллический трафарет и последовательность технологических операций его изготовления.

Биметаллические трафареты обеспечивают линейные размеры с точностью ± 10 мкм. Износоустойчивость трафарета — не менее 150 напылений.

Повышения точности можно достигнуть при использовании контактных трафаретов. Создание рисунка с помощью таких трафаретов иллюстрируется на рис. 9.2. На подложку наносится пленка, которая при достаточной прочности сцепления с подложкой может вместе с тем легко удаляться травлением. Методами фотолитографии в ней создается рисунок. Эту пленку можно рассматривать как трафарет, абсолютно плотно совмещенный с подложкой. Дальнейшие операции состоят в осаждении рабочей пленки и обработке подложки в таких химических реагентах, которые, не воздействуя на материал тонкопленочной схемы, стравливают пленку-трафарет. При этом удаляются и те участки рабочей пленки, которые нанесены на поверхность контактного трафарета. Метод получил название обратной (взрывной) фотолитографии.

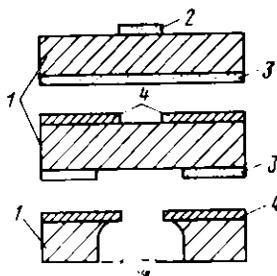


Рис. 9.1. Последовательность технологических операций создания биметаллического трафарета:

1 - медная фольга; 2, 3 - фоторезист; 4 - пленка никеля

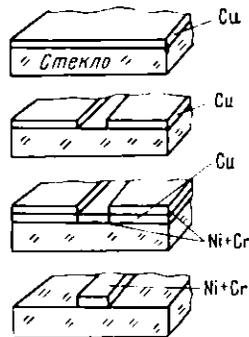


Рис. 9.2. Создание рисунка при использовании контактного трафарета

К материалам для контактных трафаретов предъявляются следующие требования. Они не должны химически взаимодействовать с материалами тонкопленочной схемы и не должны испаряться при нагревании подложек в процессе получения тонких пленок. Этим требованиям удовлетворяют медь, никель, алюминий, фоторезисты.

Возможность использования фотолитографии для получения рисунка в тонкопленочных схемах определяется, в первую оче-

Таблица 9.5. Химические травители для тонких пленок

| Материал пленки | Химические травители |
|----------------------------------|---|
| Cu | 1) HCl в присутствии стержня Zn 2) HCl + H ₂ O (1 : 1) в присутствии стержня Al |
| Ni+Cr | 1) HNO ₃ + HCl + H ₂ O (1 : 1 : 3) 2) HCl + H ₂ O (1 : 1) при T = 50 °C |
| Al | 1) HNO ₃ + H ₃ PO ₄ (1 : 10) 2) H ₃ PO ₄ + H ₂ O (1 : 1) |
| Cu | 1) FeCl ₃ (30 г) + H ₂ O (100 мл) 2) KJ (50 г) + J ₂ (25 г) + H ₂ O (100 мл) |
| Al | [HCl + HNO ₃ (1 : 3)] + [H ₂ O] (1 : 4) |
| Ti | 1) H ₂ O ₂ + HF (1 : 1) 2) H ₂ O + H ₃ PO ₄ (1 : 1) |
| Si SiO (SiO не менее 20 ... 30%) | H ₃ PO ₄ + HNO ₃ + HF (60 : 5 : 1) |

редь, наличием таких химических реактивов, которые способны локально травить пленки, не воздействуя на защитный рельеф фоторезиста. В настоящее время такие травители найдены для достаточно большого числа материалов. Данные представлены в табл. 9.5.

9.5. ТИПОВОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Процесс изготовления рассматривается на примере тонкопленочной ИС на основе тантала. В такой ИС конденсаторы имеют структуру — Ta—Ta₂O₅—Al, а резисторы — Ta—Ta₂O₅, проводники и контактные площадки изготавливаются из Ta. Последовательность операций представлена на рис. 9.3.

Ситалловые подложки очищаются кипячением в смеси перекиси водорода, аммиака и воды (40 : 1 : 125) с последующей промывкой в дистиллированной воде. Окончательная очистка проводится в парах изопропилового спирта.

На очищенные подложки методом ионно-плазменного напыления (см. гл. 6) наносится пленка тантала. Методом фотолитографии в пленке тантала создается рисунок нижних обкладок конденсаторов, резисторов, проводников и контактных площадок.

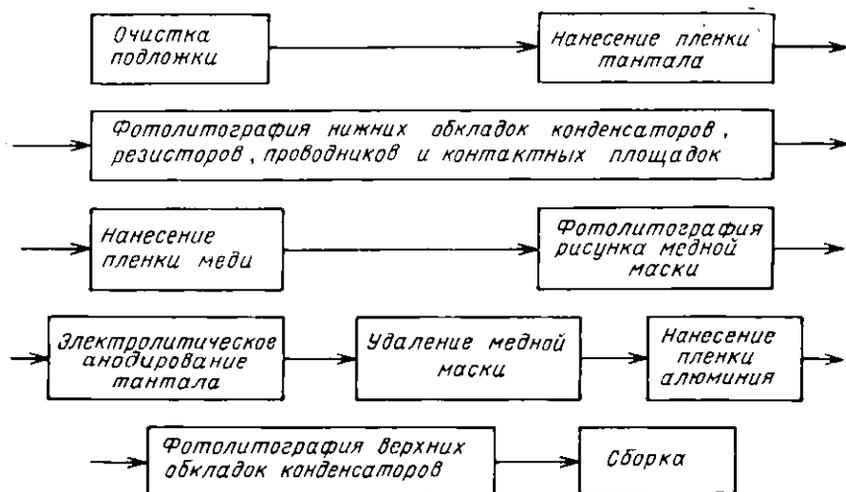


Рис. 9.3. Последовательность операций при изготовлении тонкопленочной схемы

Следующие операции направлены на получение контактной маски из меди, защищающей проводники и контактные площадки при электролитическом анодировании тантала. Эти операции включают нанесение сплошной пленки меди методом вакуумного термического напыления (см. гл. 6) и создание в пленке меди рисунка маски методом фотолитографии.

На незащищенных медью участках электролитическим анодированием производится частичное окисление пленки тантала с образованием Ta_2O_5 . В качестве электролита могут использоваться 10%-ные растворы лимонной, уксусной или серной кислот. Элементы рисунка из танталовой пленки, соединенные между собой контактной маской, служат анодом.

По окончании процесса анодирования медная маска удаляется. На подложку наносится сплошной слой алюминия, в котором методом фотолитографии создается рисунок верхних обкладок конденсаторов.

9.6. СБОРКА ГИБРИДНЫХ МИКРОСХЕМ

Процесс сборки гибридных схем сводится к присоединению активных приборов к тонкопленочным или толстопленочным схемам, к закреплению этих схем на основании корпуса и герметизации корпуса.

Крепление подложек схем на основании корпусов осуществляется приклеиванием эпоксидными смолами или легкоплавкими стеклами. Приклеивание эпоксидными смолами используется и для крепления кремниевых кристаллов с активными элементами на подложки пленочных схем. В гибридных схемах нашли применение следующие методы монтажа.

Сварка косвенным импульсным нагревом (СКИИ) осуществляется за счет нагрева зерна импульсом тока (рис. 9.4). При этом происходит высокий локальный нагрев проволоки в месте соединения и повышается пластичность материалов. Благодаря этому данный способ может быть использован для более широкого ассортимента материалов, применяемых для контактных площадок. Заостренный конец инструмента имеет максимальную температуру. Диапазон давления меняется от $(30 \dots 50) \cdot 10^{-2}$ Н в зависимости от материала и толщины проволоки, длительность импульса от 0,05 до 3 с, максимальная мощность в импульсе не превышает 0,9 кВт.

Метод термокомпрессии и СКИИ можно дополнить вибрацией зерна с ультразвуковой частотой (обычно 40 ... 60 кГц). В этом случае метод соединения деталей принято называть ультразвуковой сваркой. Вибрация приводит к разрушению оксидных пленок на поверхности свариваемых металлов.

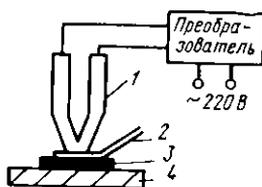


Рис. 9.4. Присоединение вывода методом сварки косвенным импульсным нагревом

1 — электрод; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — основание

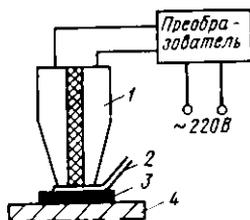


Рис. 9.5. Присоединение вывода методом сварки «сдвоенным электродом»:

1 — сдвоенный электрод; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — основание

Сварка «сдвоенным электродом» осуществляется пропусканием сварочного тока между двумя электродами, расположенными с одной стороны свариваемых деталей (рис. 9.5).

Используя «сдвоенные электроды», можно проводить и пайку. Поскольку выводы припаиваются к пленкам малой толщины, целесообразно производить микродозировку припоя и использовать для него материалы, слабо растворяющие материал пленки.

Сварка лазерным лучом и сварка электронным лучом, в отличие от ранее рассмотренных методов, приводит к локальному расплавлению соединяемых материалов. Поэтому только прецизионное управление интенсивностью излучения может позволить применять эти методы для присоединения выводов к тонким пленкам.

Герметизация металлокерамических корпусов для гибридных схем осуществляется пайкой. Герметизация корпусов панельного типа осуществляется заливкой корпуса компаундом со стороны выводов.

Глава 10. ПРЕДМЕТ И ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

10.1. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

При конструировании интегральных микросхем мы имеем дело с элементами и компонентами. Элемент — часть микросхемы, реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента, кото-

рая выполнена нераздельно от кристалла или подложки и не может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации. Компонент — часть микросхемы (или сама микросхема), реализующая функции какого-либо электрорадиоэлемента (или функционального блока), которая может быть выделена как самостоятельное изделие с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации.

Конструирование микросхем состоит из следующих этапов: выбор структуры и электрофизических параметров подложки; формулировка требований к электрофизическим параметрам слоев, образующих элементы, и к компонентам; разработка топологии; выбор корпуса и разработка комплекта документации на микросхему.

Исходными данными при конструировании микросхем являются: принципиальная электрическая схема с номинальными значениями и допусками на электрические параметры элементов и компонентов, с указанием возможных мест появления паразитных элементов в электрической схеме; базовый технологический процесс с указанием технологических допусков (см гл. 8, табл. III, П2). Технологический процесс — основа для первых двух этапов конструирования микросхем. Если выработанные требования к параметрам подложки и диффузионным слоям не удовлетворяются базовым технологическим процессом, то режимы последнего необходимо корректировать.

Основной этап конструирования микросхемы — разработка топологии. Она включает расчет геометрических размеров и элементов, разработку эскизов топологии, определение необходимого количества изолированных областей (для полупроводниковых микросхем), разработку вариантов топологии и ее оптимизацию. Главной и наиболее сложной частью разработки топологии является расчет геометрических размеров элементов, так как в основном от него зависит работоспособность микросхемы и ее надежность. Интеграция схемы на одном кристалле заключается в добавлении паразитных элементов: емкостей изолирующего *p-n* перехода; резисторов, возникающих при ликвидации пересечений; паразитных элементов разводки и др.

При разработке топологии БИС с числом элементов около 10 000 требуется при «ручном» проектировании более одного человеко-года, поэтому необходима автоматизация проектирования. При полной автоматизации проектирование БИС указанной емкости требует приблизительно семь человеко-дней.

Разработка топологии гибридных микросхем аналогична разработке топологии полупроводниковых микросхем, но более про-

ста из-за больших размеров элементов и меньшей степени интеграции.

Выбор корпуса (см. § 8.3, 8.4, табл. ПЗ) определяется необходимым числом выводов, размером подложки или кристалла и назначением микросхемы.

В комплекте документации на микросхему должна содержаться полная информация о ее технологии изготовления, конструкции, назначении, нормах на параметры, режимах испытаний и др. Упрощение конструирования достигается автоматизацией выпуска конструкторской документации.

Каждый тип микросхемы (см. гл. 8) имеет свои особенности конструирования, которые определяются технологией изготовления микросхем, используемой элементной базой и наличием компонентов.

При заданном базовом технологическом процессе изготовления полупроводниковых микросхем (известны глубины залегания p - n переходов, поверхностные концентрации примесей, метод изоляции и др.) рассчитываются электрофизические параметры структуры: удельная емкость; напряжение пробоя; обратные токи переходов; удельное сопротивление слоев; геометрические размеры и параметры элементов.

10.2. ТИПЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ, ИХ ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

В настоящее время среди типов микросхем (полупроводниковые, пленочные и гибридные) доминирующее положение занимают полупроводниковые микросхемы. На одном кристалле изготавливаются микросхемы с числом элементов до 10^6 . Объем выпуска полупроводниковых микросхем на несколько порядков превышает объем выпуска гибридных микросхем. Однако это не снижает значимости последних. Есть типы микросхем, которые имеют лучшие показатели, если их изготавливать в виде гибридных. К ним относятся:

микросхемы с высокой точностью элементов и возможностью их подстройки (прецизионные, высокочастотные и др.) или значительной мощности;

микросхемы частного применения (преобразователи аналог - код, микросхемы питания и др.);

микросхемы СВЧ-диапазона.

Технологические методы изготовления гибридных микросхем открывают возможности для замены ими методов многослойного печатного монтажа и позволяют повысить функциональную сложность, так как в качестве компонентов могут использоваться микросхемы и даже БИС. Поэтому гибридные микросхемы явля-

ются не конкурентом полупроводниковых микросхем, а дополнением последних, расширяющим их возможности.

В полупроводниковых микросхемах все схемные элементы изготавливаются в приповерхностном слое и на поверхности полупроводниковой подложки. Пассивными элементами в кремниевых полупроводниковых микросхемах являются резисторы и конденсаторы, активными - биполярные и МОП-транзисторы, диоды, транзисторы с барьером Шотки, а также униполярные транзисторы с барьером Шотки на GaAs и др.

В гибридных микросхемах, изготовленных по пленочной технологии, получают только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и иногда индуктивности), а активные - являются навесными.

В табл. 10.1 представлены максимальные и минимальные сопротивления резисторов и емкости конденсаторов и разброс их номиналов δ . Катушки индуктивности обычно имеют номинал до

Таблица 10.1. Параметры пассивных элементов микросхем

| Тип микросхемы | | Резисторы | | | Конденсаторы | | |
|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|-----------------|-----------------|--------------|
| | | R_{\min} , Ом | R_{\max} , кОм | δ , % | C_{\min} , пФ | C_{\max} , пФ | δ , % |
| Полупроводниковая | | 1...10 | 100...1000 | 15...20 | — | 200 | 20 |
| Гибридная | тонкопленочная | 1...10 | 1000...100 000 | 15...20 | 1...10 | 100 | 15...20 |
| | толстопленочная | 1...10 | 100...1000 | 50 | 50 | 2500 | 15...20 |

нескольких микрогенри. Из табл. 10.1 видно, что номиналы элементов пленочных микросхем превышают соответствующие значения номиналов элементов для полупроводниковых микросхем и имеют приблизительно такой же разброс. Однако в пленочной технологии по сравнению с полупроводниковой возможна подгонка значений, и их разброс может составлять от единиц до десятка долей, а в отдельных случаях и до сотых долей процента. Указанное отличие позволяет получать прецизионные пленочные и гибридные микросхемы.

В качестве навесных компонентов гибридных микросхем используются активные приборы (диоды, биполярные и униполярные транзисторы, микросхемы и даже БИС), а также пассивные элементы больших номиналов.

10.3. ЗАДАЧИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ

Как было указано, при разработке топологии полупроводниковых микросхем рассчитывают геометрические размеры элементов, особенно активных, электрофизические характеристики полупроводниковых подложек, диффузионных слоев. Для этой цели используют уравнения непрерывности, Пуассона, а также уравнения, определяющие плотность тока и распределение примесей в рабочих слоях. При расчете геометрических размеров элементов гибридных микросхем использовать указанные уравнения нет необходимости. Ниже приводятся рассчитываемые параметры.

Для резисторов: номинальное сопротивление R , его разброс с учетом рабочего диапазона температур; напряжение пробоя; граничная частота $\omega_{гр}$, на которой значение модуля сопротивления уменьшается до $0,7R$ (значение R соответствует $\omega=0$).

Для конденсаторов: номинальная емкость C , ее разброс с учетом рабочего диапазона температур; напряжение пробоя; отношение $C/C_{п}$ ($C_{п}$ — паразитная емкость); добротность при заданной частоте.

Для межэлементных соединений и многослойной металлизации: максимальный рабочий ток; погонные паразитные параметры — активное сопротивление, емкость и индуктивность, граничная частота.

Для биполярных транзисторов: коэффициенты передачи тока в схеме с общей базой $h_{21Б}$ и общим эмиттером $h_{21Э}$ и их температурный разброс; сопротивления базы и тела коллектора; емкости эмиттерного и коллекторного переходов и паразитная емкость изоляции; напряжения пробоя коллекторного перехода и участка эмиттер — коллектор; максимальный рабочий ток; граничные частоты $\omega_{h_{21Б}}$ и $\omega_{h_{21Э}}$.

Для МОП-транзисторов: крутизна; пороговое напряжение; температурный разброс крутизны; температурный разброс порогового напряжения; постоянная времени крутизны; емкости затвор — исток, затвор — сток, исток — подложка и др.; сопротивления истока и стока; сопротивления истока — подложка, сток — подложка и др.

Основные параметры элементов пленочных и гибридных микросхем для резисторов, конденсаторов, межэлементных соединений и многослойной металлизации те же, что и для элементов полупроводниковых микросхем. Для катушек индуктивности: номинальная индуктивность L ; ее допуск в диапазоне частот; добротность на заданной частоте; собственная резонансная частота, определяемая индуктивностью и межвитковой паразитной емкостью.

Базовые уравнения. Все базовые уравнения, используемые при расчете характеристик элементов микросхем, реализуются при анализе биполярных транзисторов типа $n-p-n$. Поэтому в настоящем разделе рассмотрим их применительно к последним.

Анализ электрических характеристик транзистора осуществляется с помощью уравнений:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\nabla j_n}{q} + g_n - r_n; \quad (10.1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\nabla j_p}{q} + g_p - r_p; \quad (10.2)$$

$$\nabla^2 \varphi = \nabla E = \frac{q}{\epsilon_n \epsilon_0} (p + N_d - n - N_a); \quad (10.3)$$

$$j_n = q(\mu_n n E + D_n \nabla n); \quad (10.4)$$

$$j_p = q(\mu_p p E - D_p \nabla p), \quad (10.5)$$

где (10.1) — (10.3) — уравнения непрерывности и уравнение Пуассона соответственно; (10.4) и (10.5) — уравнения, определяющие плотности электронного и дырочного токов. В уравнениях приняты следующие обозначения: n и p — концентрации электронов и дырок; φ — электростатический потенциал; E — напряженность электрического поля; D_n и D_p — коэффициенты диффузии электронов и дырок; μ_n и μ_p — подвижности электронов и дырок; ϵ_n — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; g и r — скорости генерации и рекомбинации; j_n и j_p — плотности тока электронов и тока дырок; N_d и N_a — концентрации доноров и акцепторов.

В табл. 10.2 представлены основные электрические кон-

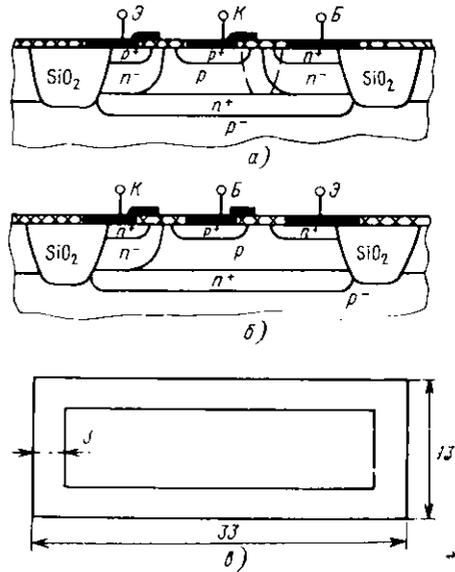


Рис. 10.1. Структура изопланарных транзисторов типа $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) на эпитаксиальных пленках типа $p-p^-$ и геометрия фотошаблона для изоляционной области SiO_2 (в)

станты и параметры некоторых материалов, используемые при расчете характеристик элементов полупроводниковых микросхем, изготовленных на Si и GaAs.

Биполярные транзисторы (с точки зрения их технологии изготовления) наиболее сложны из полупроводниковых приборов. Наиболее совершенна изопланарная технология на эпитаксиальных пленках типа $p-p^+$.

На рис. 10.1,а,б показаны конфигурации транзисторов типа $p-n-p$ и $n-p-n$; через p^+ и n^+ обозначены области с относительно малой концентрацией примесей. Для формирования структур используется эпитаксиальная пленка толщиной 1,5 ... 2,0 мкм с удельным сопротивлением 0,5 ... 1,0 Ом·см.

Таблица 10.2. Основные электрические константы и параметры некоторых материалов, используемых при расчете характеристик элементов полупроводниковых микросхем

| Константы и параметры | Значения |
|--|-----------------------------|
| Элементарный заряд q , Кл | $1,6 \cdot 10^{-19}$ |
| Постоянная Больцмана k , Дж/К | $1,37 \cdot 10^{-23}$ |
| Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума) ϵ_0 , Ф/см | $36\pi^{-1} \cdot 10^{-11}$ |
| Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума) μ_0 , Гв/см | $4\pi \cdot 10^{-9}$ |
| Ширина запрещенной зоны, В: | |
| кремния | |
| при $T = 0$ К, q_{30} | 1,21 |
| при $T = 300$ К, q_1 | 1,12 |
| арсенида галлия | |
| при $T = 0$ К, q_{30} | 1,52 |
| при $T = 300$ К, q_1 | 1,43 |
| Собственная концентрация носителей (при $T = 300$ К) n_i , см ⁻³ | |
| в Si | $1,5 \cdot 10^{10}$ |
| в GaAs | $1,8 \cdot 10^6$ |
| Диэлектрическая проницаемость (низкочастотная) ϵ , отн. ед.: | |
| GaAs | 13,1 |
| Si | 11,7 |
| SiO ₂ | 3,9 |
| SiO | 5,1...6 |
| Si ₃ N ₄ | 7,5 |
| Al ₂ O ₃ | 8,1...9 |

Изопланарные транзисторы характеризуются ограничением боковой диффузии примесей слоем SiO₂, что обеспечивает самосовмещение диффузионных областей и не требует большой точности

при фотолитографии. Это также исключает область между боковыми частями коллекторного и изолирующего переходов, имеющуюся при изоляции p - n переходом.

Замена боковой части изолирующего перехода на слой SiO_2 и прилегание боковых частей p - n переходов к SiO_2 приводит к существенному уменьшению емкостей эмиттерного и коллекторного переходов и площади, занимаемой транзистором. Для еще большего уменьшения емкостей p - n переходов p - n - p транзистора проводится добавочное окисление, показанное штриховой линией на рис. 10.1,а.

На рис. 10.1,а показана геометрия и ориентировочные размеры, мкм, окна в защитных пленках для проведения разделительного окисления. На рисунке видно, что транзисторы имеют площадь 30×10 мкм² (с учетом половины площади окна для проведения разделительного окисления).

Малые геометрические размеры изопланарных транзисторов обеспечиваются благодаря указанным их особенностям и уменьшению минимальных размеров контактных окон, ширины или металлизации и расстояния между ними. Это увеличивает предельную частоту транзисторов до значений порядка нескольких гигагерц. Однако существенную роль продолжают играть биполярные транзисторы с окисной изоляцией и изоляцией p - n переходом. Причем в последних проявляется максимальное количество эффектов, присущих полупроводниковым приборам. Поэтому именно биполярным транзисторам с изоляцией p - n переходом будет уделено основное внимание. Учет влияния боковых частей изоляции в технологии «изопланар» сводится к учету конечной скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела $\text{Si}-\text{SiO}_2$.

На рис. 10.2 показана структура биполярного транзистора n - p - n типа. Здесь h_e и h_k — глубина залегания эмиттерного и коллекторного переходов; $h_{\text{эп}}$ — толщина эпитаксиальной пленки; w_0 — ширина металлургической базы; w — ширина собственной базы (штриховой линией показаны слои пространственных зарядов) и L — длина эмиттера.

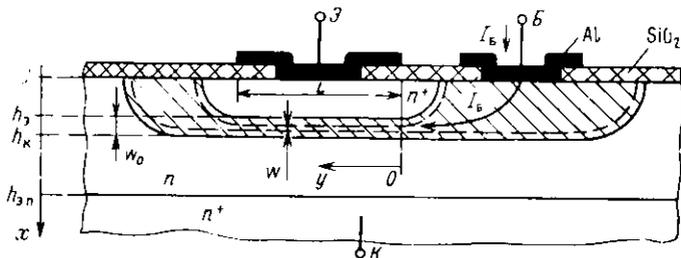


Рис. 10.2. Структура дискретного биполярного n - p - n транзистора

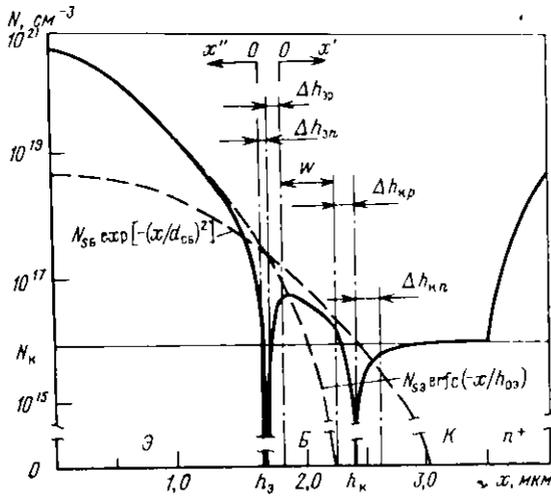


Рис. 10.3 Распределение примесей в биполярном *n-p-n* транзисторе

На рис. 10.3 представлено результирующее распределение примесей (сплошная линия) и распределение примесей при базовой и эмиттерной диффузиях. На рисунке N_{s3} , N_{s6} и N_k — поверхностные концентрации примесей при эмиттерной, базовой диффузиях и концентрация примесей в коллекторной области; Δh_{zn} , Δh_{zp} , Δh_{kn} и Δh_{kp} — толщина слоев пространственных зарядов в соответствующих областях.

Распределение примесей (см. § 3.2) при эмиттерной диффузии

$$N_3(x) = N_{s3} \operatorname{erfc} \frac{x}{h_{03}} = \frac{2N_{s3}}{\sqrt{\pi}} \int_{x/h_{03}}^{\infty} e^{-u^2} du, \quad (10.6)$$

при базовой диффузии

$$N_6(x) = N_{s6} \exp[-(x/h_{06})^2], \quad (10.7)$$

где h_{03} и h_{06} — постоянные, зависящие от параметров диффузионного процесса ($h_0 = 2\sqrt{Dt}$, см. § 3.2); $u = x/h_{03}$.

Результирующее распределение примесей определяется, как

$$N(x) = N_a - N_d = -N_{s3} \operatorname{erfc}(x/h_{03}) + N_{s6} \exp[-(x/h_{06})^2] - N_k. \quad (10.8a)$$

Значения h_{03} и h_{06} находятся из заданных h_3 , h_k , N_{s3} , N_{s6} и N_k . На рис. 10.3 представлено соответствующее уравнению (10.8a)

распределение примесей $|N(x)|$ для $N_{s3} = 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³; $N_{s6} = 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $h_s = 1,7$ мкм; $h_k = 2,4$ мкм; $h_{0s} = 0,683$ мкм и $h_{06} = 0,964$ мкм.

Как следует из анализа выражений (10.6), (10.7), они близки друг к другу. Поэтому результирующее распределение (10.8а) можно представить в виде

$$N(x) \approx -N_{s3} \exp[-(x/h_{0s})^2] + N_{s6} \exp[-(x/h_{06})^2] - N_k. \quad (10.8б)$$

Из соотношения (10.8б) получим

$$h_{06} \approx h_k [\ln(N_{s6}/N_k)]^{-1/2} \quad (10.9а)$$

и

$$h_{0s} \approx h_s [\ln(N_{s3}/N_1)]^{-1/2}, \quad (10.9б)$$

где $N_1 = N_{s6} \exp[-(h_s/h_{06})^2] - N_k$.

Для распределения, показанного на рис. 10.3 и описанного выражением (10.8б), значения $h_{0s} = 0,610$ мкм, $h_{06} = 0,963$ мкм.

При расчете электрических характеристик транзисторов иногда аппроксимируют выражения (10.6) и (10.7) простой экспоненциальной функцией вида

$$N(x) = N_0 \exp(-x/h'_0), \quad (10.10а)$$

где

$$h'_0 = h_s; k \ln(N_{s3}/N_{s6}N_1; k). \quad (10.10б)$$

Погрешность такой аппроксимации уменьшается при уменьшении перепада концентраций и толщины соответствующих областей. При перепаде в полтора порядка и толщине области 0,7 мкм ошибка аппроксимации не превышает 50%, что несущественно влияет на точность выражений, получаемых с помощью аппроксимации.

Глава 11. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

11.1. РАБОЧЕЕ СЛОИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Наибольшее количество слоев имеют микросхемы на основе биполярных транзисторов (рис. 10.1): эмиттерный, базовый, скрытый n^+ -слой — диффузионные и коллекторный слои; подложка

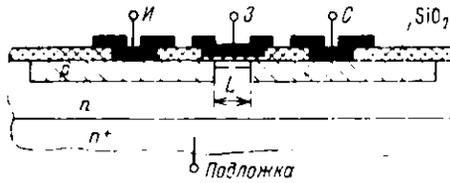


Рис. 11.1. Структура МДП-транзистора с индуцированным p -каналом

p -типа (при изоляции p - n переходом). Для изготовления микросхем на основе МОП-транзисторов необходим лишь один диффузионный слой (рис. 11.1). В биполярных микросхемах удельное сопротивление коллекторной (эмиттерной) области $\rho_k = 0,1 \dots 5,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, что соответствует концентрации $N_k = 10^{16} \dots 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Удельное сопротивление подложки p -типа обычно составляет $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, а соответствующая концентрация примесей $N = 1,4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Характерны следующие толщины слоев: $h_i = 1,0 \dots 2,5 \text{ мкм}$, $h_{\text{ш}} = 5 \dots 15 \text{ мкм}$, $h_k = 2,0 \dots 3,5 \text{ мкм}$, толщина n -слоя равна $3 \dots 8 \text{ мкм}$. Поверхностные концентрации примесей составляют $N_s = 10^{19} \dots 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, $N_{\text{ш}} = 10^{17} \dots 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина металургической базы $\omega_b = 0,5 \dots 1,0 \text{ мкм}$, среднее удельное сопротивление базовой области $\rho = 0,1 \dots 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

В МОП-микросхемах удельное сопротивление подложки равно $1 \dots 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, глубина залегания истокового и стокового p - n переходов $2 \dots 3 \text{ мкм}$.

Для полной характеристики электрических параметров слоев и переходов, образующих элементы микросхем, необходимо знать толщины слоев пространственных зарядов p - n переходов, удельную барьерную емкость C_0 в ее зависимость от напряжения, удельные сопротивления слоев R , тепловые токи I_0 и разброс всех этих величин. Кроме того, необходимо знать, как влияет падение напряжения в активной базовой области транзистора на плотность эмиттерного тока.

11.2. УДЕЛЬНАЯ БАРЬЕРНАЯ ЕМКОСТЬ p - n ПЕРЕХОДОВ

Удельная барьерная емкость p - n переходов

$$C_0 = \epsilon_{\text{ш}} \epsilon_0 A d \quad (11.1a)$$

или

$$C_0(U) = C_0(0) (1 - U A \phi_0)^{-1/2}, \quad (11.16)$$

где $\epsilon_{\text{ш}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; U — напряжение на переходе; $A \phi_0$ — контактная разность

потенциалов; $C_b(0)$ — удельная барьерная емкость при $U=0$; n — постоянная величина. Значение $n=2$ соответствует ступенчатому p - n переходу, а $n=3$ — плавному p - n переходу с линейным распределением концентрации примесей в слое пространственного заряда. Реальный переход имеет $2 < n < 3$. Величина Aq_0 определяется выражением

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln \left\{ \frac{N(h - \Delta h_{p_0}) N(h + \Delta h_{n_0})}{n_i^2} \right\}, \quad (11.2)$$

где h — глубина залегания перехода; Δh_{n_0} , Δh_{p_0} — толщина слоев пространственного заряда при напряжении $U=0$; $\varphi_T = kT/q$ — температурный потенциал (k — постоянная Больцмана, T — температура, К); n_i — собственная концентрация. При $T=300$ К $\varphi_T = 0,026$ В. Значения Aq_0 эмиттерного и коллекторного переходов равны 0,78 ... 0,82 В и 0,6 ... 0,7 В соответственно.

Из формулы (11.1б) следует, что при $U = Aq_0$ барьерная емкость обращается в бесконечность. На практике это оказывается неверным, поэтому при оценке $C_0(U)$ ($U \approx Aq_0$) либо используются завышенные значения Aq_0 в формуле (11.1б), либо применяется другая полуэмпирическая формула

$$C_0(U) = \frac{C_0(0)}{[(1 - U/Aq_0)^2 + b]^{1/2n}} \left\{ 1 + \frac{b}{(n-1)[(1 - U/Aq_0)^2 + b]} \right\}, \quad (11.3a)$$

где $b \ll 1$. Из анализа формулы (11.3a) следует, что при $U = Aq_0$ барьерная емкость достигает максимума:

$$C_{0 \max}(\Delta\varphi_0) = nC_0(0) [(n-1)b]^{1/2n}. \quad (11.3б)$$

При $U > Aq_0$ влиянием барьерной емкости можно пренебречь, поскольку определяющую роль начинает играть диффузионная емкость. Для малого прямого и обратного напряжений на переходе формула (11.3a) совпадает с (11.1б).

Характерная особенность емкости планарного перехода связана с неодинаковой глубиной залегания перехода по направлениям: перпендикулярному $x(h)$ и параллельному $y(h')$ к поверхности полупроводника (см. рис. 10.2). Это приводит к различным удельным емкостям донной и боковой частей перехода и в первую очередь относится к эмиттерному переходу. Обычно $h'/h_s = 0,3 \dots 0,5$, что означает существенное превышение удельной емкости боковой поверхности эмиттерного перехода $C_{30б}$ над удельной емкостью донной части $C_{30д}$: $C_{30б} = (2 \dots 3)C_{30д}$. Для коллекторного перехода $h'_k/h_k = 0,85 \dots 0,95$ или $h'_k/h_k \approx 1$, т. е. боковую часть коллекторного перехода можно считать четвертью окружности с радиусом h_k , а также считать одинаковыми удельные емкости боковой поверхности и донной части.

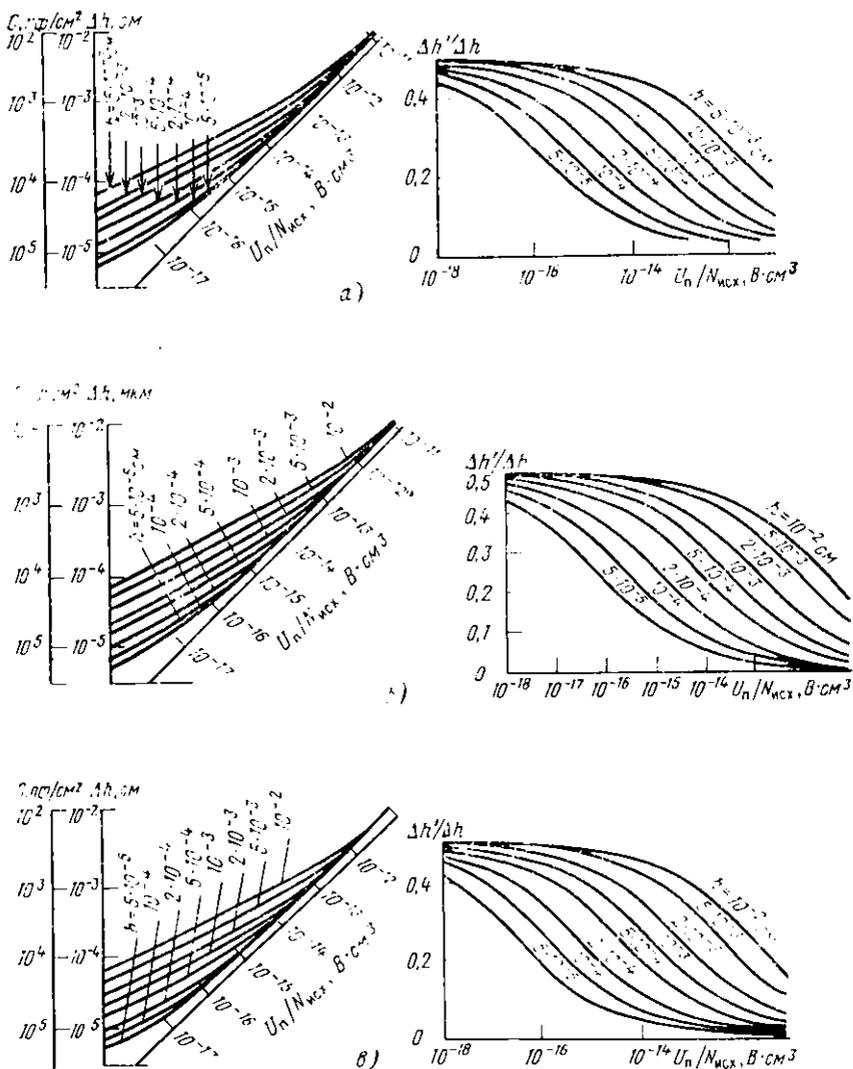


Рис. 112. Номограммы Лоуренса — Уорнера для определения удельной барьерной емкости плавного $p-n$ перехода и толщины слоя его пространственного заряда и распределения толщины слоев по областям p - и n -типов для $N_{\text{вкx}}/N_a = 10^{-2}$ (а); 10^{-3} (б); 10^{-4} (в)

Значение n (11.3) находят из решения уравнения Пуассона для каждого перехода. Это связано с большими трудностями при вычислении. Поэтому на практике пользуются расчетными номограммами Лоуренса — Уорнера, построенными на основе численного решения соответствующих уравнений. Полагалось, что исходная концентрация примесей $N_{\text{вex}}$ в базовой области перехода постоянна (в биполярном транзисторе этому соответствует коллекторный p - n переход) и распределение концентрации примеси в эмиттерной области выражается функцией Гаусса или дополнительной функцией ошибок. С помощью номограмм можно определить толщины слоев пространственных зарядов и удельные емкости переходов при различных напряжениях смещения.

На рис. 11.2, *a—в* представлены номограммы для $N_{\text{вex}}/N_s = 10^{-2}$; 10^{-3} ; 10^{-4} . Здесь N_s — поверхностная концентрация примесей в базовой области; $U_n = -U + \Delta\varphi_0$ — полная разность потенциалов на переходе; M' — толщина слоя пространственного заряда в эмиттерной части перехода. Кривые построены в предположении гауссовского распределения примесей. Однако их можно использовать и при расчете удельной емкости эмиттерного перехода. Для этого в качестве исходной следует брать концентрацию акцепторной примеси в точке h_s и заменить распределение примеси при эмиттерной диффузии на распределение примесей при базовой диффузии. В этом случае расчет по номограммам Лоуренса — Уорнера даст завышенное значение M_n и заниженное M_p , а значение M приблизительно будет соответствовать реальному. Поэтому полученное значение удельной емкости эмиттерного перехода будет близко к истинному. Удельные емкости коллекторного перехода и донной части эмиттерного перехода равны 100 ... 400 и 250 ... 900 пФ/мм² соответственно (при напряжении на переходе $U = 0$).

Изолирующий переход в микросхеме (см. рис. 8.1) состоит из двух частей: донной и боковой. Первая образована в эпитаксиальной пластине, вторая получена при проведении изолирующей диффузии. Поэтому различаются и соответствующие удельные емкости. Для донной части изолирующего перехода удельная емкость равна 90 ... 100 пФ/мм², для боковой 90 ... 320 мФ/мм² (при напряжении на переходе $U = 0$).

Пример. Определить удельные емкости донной части эмиттерного и коллекторного переходов. Рассматриваемые переходы имеют характеристики, указанные в § 10.3 (см также рис. 10.3): $h_0 = 1,7$ мкм; $h_n = 2,4$ мкм; $N_{s0} = 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³; $N_{s0n} = 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³; $N_{\text{акт}} = N_n = 10^{16}$ см⁻³.

Донная часть эмиттерного p - n перехода. Примем $\Delta\varphi_0 = 0,8$ В. Концентрация акцепторной примеси в точке h_s равна $N_n(h_s) = 2,23 \cdot 10^{17}$ см⁻³; $N_n(h_s)/N_{s0n} = 4,5 \cdot 10^{-2}$. Воспользуемся номограммами Лоуренса — Уорнера, представленными

Таблица 11.1. Параметры эмиттерного перехода

| Параметры | U, В | | | |
|---|------|------|------|------|
| | 0,3 | 0 | -0,3 | -2 |
| $(U_{\text{п}}/N_{\text{исх}}) \cdot 10^{10}$, В·см ³ | 1,8 | 3,6 | 5,0 | 12,6 |
| $\Delta h_{\text{п}}$, мкм | 0,14 | 0,18 | 0,21 | 0,26 |
| $C_{\text{эод}}$, пФ/мм | 740 | 580 | 500 | 400 |

ми на рис. 11.2,б. С их помощью составлена табл. 11.1. Из соотношений (11.16) и (11.3а) получим $a \approx 2,2$ и $b \approx 0,02$. Максимальное значение найдем из выражения (11.3б):

$$C_{\text{эод max}} \approx 2600 \text{ пФ/мм}^2.$$

Коллекторный *p-n* переход. Примем $A_{\text{q}} = 0,7$ В, $N_{\text{исх}}/N_{\text{кб}} = 2 \cdot 10^{-3}$. Воспользуемся кривыми рис. 11.2,б и с их помощью составим табл. 11.2. Соответствующее значение $n = 2,75$ в формуле (11.16).

Таблица 11.2. Параметры коллекторного перехода

| Параметр | U, В | | | |
|---|------|------|------|------|
| | 0 | -1 | -3 | -7 |
| $(U_{\text{п}}/N_{\text{исх}}) \cdot 10^{10}$, В·см ³ | 0,7 | 1,7 | 3,7 | 7,7 |
| $\Delta h_{\text{р}}$, мкм | 0,18 | 0,23 | 0,26 | 0,35 |
| $\Delta h_{\text{п}}$, мкм | 0,26 | 0,42 | 0,56 | 0,85 |
| $C_{\text{к}}$, пФ/мм ² | 220 | 160 | 120 | 85 |

11.3. НАПРЯЖЕНИЕ ПРОБОЯ *p-n* ПЕРЕХОДА

Пробой коллекторного перехода транзистора определяется лавинным умножением, которое происходит при напряженности электрического поля $E_{\text{max}} \approx 3 \cdot 10^5$ В/см. Решение уравнения Пуассона, проведенное Лоуренсом и Уорнером, позволяет определить напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$. На рис. 11.3 представлены номограммы, по которым можно найти $U_{\text{проб}}$ при гауссовском распределении примесей. Кривые построены для плоского перехода в диапазоне $10^{-2} \leq N_{\text{проб}}/N \leq 10^2$. Учет искривления перехода на его границах вызывает увеличение в этих местах напряженности поля по сравнению с плоской частью. Поэтому пробой планарных переходов происходит по периферии, вызывая некоторое уменьшение $U_{\text{проб}}$ по сравнению со значением, полученным из рис. 11.3. На рис. 11.4 представлена зависимость $U_{\text{проб}}$ ступенчатого перехода от радиуса закругления. Предполагается, что на периферии перехода он представляет четверть окружности радиусом h . Из рисунка видно, что влияние периферийных частей уменьшается

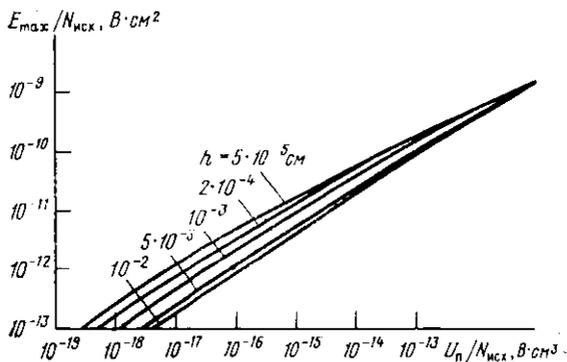


Рис. 11.3. Номограммы Лоуренса - Уорнера для определения напряжения пробоя плавного р-п перехода

при увеличении концентрации примеси в исходном материале. Кроме того, $U_{\text{проб}}$ плавного перехода будет меньше, чем ступенчатого при $h = \infty$. Поэтому для оценочных расчетов при $h = 2 \dots 10$ мкм и $N_{\text{исх}} \geq 10^{16}$ см⁻³ напряжение $U_{\text{проб}}$, полученное из рис. 11.3, оказывается достаточно точным. Типичные значения напряжения пробоя эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов составляют 6...9, 10...90 и 15...100 В соответственно.

Пример. Определить напряжение пробоя коллекторного перехода, имеющего параметры, данные в примере § 11.2. Используя рис. 11.3, $E_{\text{max}}/N_{\text{исх}} \approx 3 \cdot 10^{11}$ В·см² и $h_{\text{к}} = 2,4$ мкм, получим $U_n/N_{\text{исх}} \approx 4 \cdot 10^{-15}$ В·см³ и $U_n = U_{\text{кв, проб}} + \Delta\varphi_0 = 40$ В, поэтому $U_{\text{кв, проб}} \approx 40$ В.

11.4. УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СЛОЕВ

Удельное сопротивление слоя, когда известны его параметры: средние значения удельного сопротивления $\bar{\rho}$ или проводимости $\bar{\sigma}$ и толщина области h_0

$$R_s = \bar{\rho} h_0 = 1 / (\bar{\sigma} h_0). \quad (11.4)$$

Однако если $\bar{\rho}$ или $\bar{\sigma}$ неизвестны, то для нахождения R_s необходимо иметь либо расчетные соотношения, либо номограммы, связывающие параметры диффузионного процесса с электрофизическими характеристиками полупроводникового материала. Это в первую очередь относится к слоям, сопротивление которых сильно зависит от параметров диффузионного процесса. Так, удельное сопротивление может меняться в следующих пределах: базового слоя от 100 до 300 Ом/□; базового, ограниченного эмиттерным

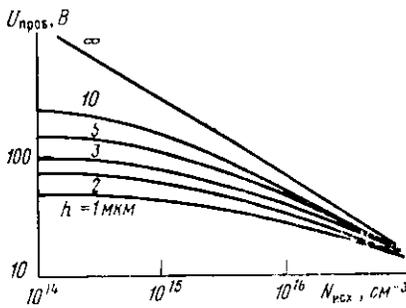


Рис. 11.4. Помограммы для определения напряжения пробоя ступенчатого $p-n$ перехода

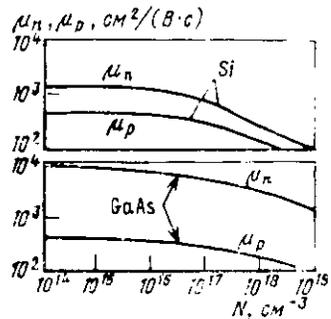


Рис. 11.5. Зависимости подвижности носителей от концентрации примесей в полупроводниковой пластине кремния и арсенида галлия

слоем от 5 до 20 $\text{кОм}/\square$; скрытого n^+ -слоя от 5 до 15 $\text{Ом}/\square$; эмиттерного от 2 до 5 $\text{Ом}/\square$. Рассмотрим подробнее лишь два первых слоя.

Базовый слой. Для определения удельного сопротивления слоя (см. рис. 10.1, 10.2) найдем его удельную проводимость

$$G_s = q \int_0^{h_{\text{ис}}} \mu_p(N_a) N_a(x) dx, \quad (11.5)$$

где $\mu_p(N_a)$ — зависимость подвижности дырок от концентрации акцепторной примеси; $N_a(x)$ — зависимость последней от координаты.

Из рис. 11.5 видно, что подвижности носителей в рассматриваемом диапазоне изменения концентраций примесей не зависят от типа последней (донорной или акцепторной). Зависимости $\mu(N)$ в логарифмическом масштабе приблизительно линейны в диапазонах

$$3 \cdot 10^{15} \leq N \leq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ для } \mu_p$$

и

$$5 \cdot 10^{15} \leq N \leq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \text{ для } \mu_n.$$

Тогда их можно представить в виде

$$\ln \mu \approx \ln K + m \ln N, \quad (11.6a)$$

где μ — подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; N — концентрация примесей, см^{-3} ; K и m — постоянные. На линейных участках имеем: $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $\mu_p = 400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_n = 1000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, при $N =$

$\approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\mu_p = 130 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $\mu_n = 270 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Тогда для μ_p $\ln K_p = 15,00$ и $m_p = -0,245$ и для μ_n

$$\ln K_n = 17,37 \quad \text{и} \quad m_n = -0,284. \quad (11.66)$$

Из (11.6) следуют зависимости подвижности от концентрации примесей

$$\mu_p; n = K_p; n N^{m_p}; n. \quad (11.7)$$

Подставляя из (11.7) выражение μ_p в (11.5), учитывая (10.8) при условии $N_{s6} \gg N_k$, получаем

$$G_s = qKN_{s6}^{m+1} \int_0^{h_k} \exp[-(m+1)(x/h_{06})^2] dx \quad (11.8)$$

Интеграл в (11.8) не имеет аналитического решения. Для того чтобы произвести интегрирование, необходимо заменить h_k на ∞ . Как показывают расчеты, такая замена дает ошибку, не превышающую 1,5... 2%. Осуществляя указанную замену и производя интегрирование, получаем

$$G_s = (qKN_{s6}^{m+1} h_{06}^2 / 2) \sqrt{\pi(m+1)}. \quad (11.9a)$$

При этом соответствующее удельное сопротивление слоя

$$R_s = [2(qKh_{06} N_{s6}^{m+1})] \sqrt{(m+1)/\pi}. \quad (11.9b)$$

Удельное сопротивление слоя можно получить также из номограмм Ирвина (см. рис. 3.19 для диффузионного p -слоя, при $N_k = 10^{16} \text{ см}^{-3}$).

Пример. Рассчитать удельное сопротивление слоя с параметрами, приведенными в § 10.3, используя расчетное соотношение и номограммы Ирвина.

Из формулы (11.9б) с учетом (11.66) $R_s = 150 \text{ Ом}/\square$, а из номограммы Ирвина (рис. 3.12) при $x/h = 0$ имеем $\bar{\sigma} = 23 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$. Соответствующее поверхностное сопротивление

$$R_s = 1/\bar{\sigma}(d-x) \approx 180 \text{ Ом}/\square.$$

Как видно, полученные значения близки.

Базовый слой, ограниченный эмиттерным слоем. Расчет R_s можно производить с помощью номограмм Ирвина. Однако эти номограммы не учитывают реального распределения примесей в базе, возникающего при эмиттерной диффузии, поэтому они дают заниженный результат. Предпочтительнее аналитический расчет. Средняя проводимость базовой области

$$\sigma_0 = q\mu_p \bar{N}_0 = q\mu_p N_G \omega, \quad (11.10)$$

где μ_p — подвижность дырок при концентрации акцепторной примеси N_G ; $N_G \omega$ — число Гуммеля (определяет удельное количество

акцепторной примеси в базовой области *n-p-n* транзистора, см. *x* рис. 10.3):

$$N_{\Gamma} = \int_0^{\omega} N_{\sigma}(x) dx. \quad (11.11)$$

Из соотношения (11.10) получаем некоторое удельное сопротивление слоя базовой области

$$R_s = 1/(\sigma_{\sigma} \omega) = (q \mu_p N_{\Gamma})^{-1}. \quad (11.12)$$

Рассчитать N_{Γ} при распределении примесей даже в виде (10.86) аналитически невозможно. Для аппроксимации распределения удобно использовать следующее выражение:

$$N_{\sigma}(x) = N_{\max \sigma} x \exp[(h_{\max \sigma} - x)/h_{\max \sigma}], \quad (11.13)$$

где координата x отсчитывается от металлургической границы эмиттерного перехода вглубь базовой области; $N_{\max \sigma}$ — максимальная концентрация примесей в базовой области; $h_{\max \sigma}$ — ее координата. Аппроксимация вида (11.13) при значениях x , лежащих между областями пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов, вносит незначительную погрешность. Для распределения примесей, описываемого выражением (10.8а), $h_{\max \sigma}$ находится из решения трансцендентного уравнения

$$\exp \left[- \left(\frac{1}{h_{0\sigma}^2} - \frac{1}{h_{\sigma}^2} \right) (h_{\max \sigma} + h_{\sigma}) \right] = \frac{h_{\omega} \sqrt{\pi} N_{s\sigma}}{h_{0\sigma}^2 N_{s\sigma}} (h_{\max \sigma} + h_{\sigma}). \quad (11.14a)$$

При использовании аппроксимации дополнительной функции ошибок функцией Гаусса, обычно используемой при расчете полупроводниковых приборов [см. (10.8б)],

$$h_{\max \sigma} = h_{\Gamma\sigma} h_{0\sigma} \left[\frac{1}{h_{0\sigma}^2 - h_{\sigma}^2} \ln \left(\frac{N_{s\sigma} h_{0\sigma}^2}{N_{s\sigma} h_{\sigma}^2} \right) \right]^{1/2} - h_{\sigma}. \quad (11.14б)$$

Общая ошибка, возникающая при совместном использовании (10.8б) и (11.14б), не превышает 15... 20%. Используя выражение (11.11) и (11.13),

$$N_{\Gamma} = N_{\max \sigma} h_{\max \sigma} \{ [\exp(1 - \Lambda h_{\sigma p} / h_{\max \sigma})] (\Lambda h_{\sigma p} / h_{\max \sigma} + 1) - [(\omega + \Lambda h_{\sigma p}) / h_{\max \sigma} + 1] \exp[1 - (\omega + \Lambda h_{\sigma p}) / h_{\max \sigma}] \}. \quad (11.15)$$

Рассмотренные соотношения позволяют определить величину R_s .

Пример. Рассчитать удельное сопротивление слоя базовой области с параметрами, приведенными в § 10.3, используя номограммы Ирвина и расчетное соотношение. Запирающее напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах $U_s = -2$ В.

Из табл. 11.1, 11.2 при $U_3 = -2$ В находим $\Delta h_{э,р} = 0,16$ мкм и $\Delta h_{к,р} = 0,24$ мкм. Используя номограммы Ирвина (см. рис. 3.12) при $x = h_0 + \Delta h_{э,р} = 1,86$ мкм, $h_{к,р} = 2,4$ мкм и $x/h_{к,р} \approx 0,77$, имеем $\sigma = 1,50$ (Ом·см)⁻¹. Эта проводимость меньше в три раза на величину проводимости области пространственного заряда коллекторного перехода $\Delta\sigma$. Значение последней найдем из этих же кривых при $x = h_{к,р} - \Delta h_{к,р} = 2,16$ мкм ($x/h_{к,р} = 0,9$): $\Delta\sigma = 0,52$ (Ом·см)⁻¹. Тогда проводимость базовой области $\sigma_6 = \sigma - \Delta\sigma = 2,02$ (Ом·см)⁻¹. Из (11.146) имеем $h_{\text{max } 6} = 0,16$ мкм, а из рис. 10.3 или формулы (10.86) $N_{\text{max } 6} = 6,2 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Из выражения (11.15) $N_{\Gamma} = 1,45 \cdot 10^{12}$ см⁻², а при $\omega = h_{к,р} - h_{э,р} - \Delta h_{э,р} - \Delta h_{к,р} = 0,3$ мкм имеем среднюю концентрацию примесей в базовой области $N_6 = N_{\Gamma} / \omega = 4,83 \times 10^{16}$ см⁻³. Из рис. 11.5 или из соотношения (11.7) при $N_6 = 4,83 \cdot 10^{16}$ см⁻³ получим $\mu_p = 262$ см²/(В·с). Из (11.10) находим $\sigma_6 = 2,01 / (\text{Ом} \cdot \text{см})$. Тогда из (11.4) при $h_0 = 0,3$ мкм имеем $R_4 \approx 16,71$ кОм/□.

Значения σ_6 , полученные из расчетного соотношения и номограмм Ирвина, близки, что связано с большой толщиной слоев пространственных зарядов. Если же положить $\Delta h_{э,р} = \Delta h_{к,р} = 0$, то из номограмм Ирвина $\sigma_6 = 2,3$ (Ом·см)⁻¹, а из соотношения (11.10) $\sigma_6 = 1,7$ (Ом·см)⁻¹. Это подтверждает, что значения σ_6 , полученные с помощью номограмм Ирвина, завышены.

11.5. ЭФФЕКТ ОТТЕСНЕНИЯ ЭМИТТЕРНОГО ТОКА В БАЗОВОМ СЛОЕ, ОГРАНИЧЕННОМ ЭМИТТЕРНЫМ СЛОЕМ (АКТИВНОЙ БАЗОВОЙ ОБЛАСТИ *n-p-n* ТРАНЗИСТОРОВ)

Ток I_B , протекая через базовую область (см. рис. 10.2), создает дополнительное смещение на эмиттерном *p-n* переходе (поверхность эмиттерного перехода перестает быть эквипотенциальной). Это вызывает изменение плотности эмиттерного тока в нижней части эмиттера, т. е. зависимость $j_{э} = j_{э}(y)$. Максимальная плотность тока будет при $y = 0$ и минимальная при $y = L$ (L — длина окна под эмиттерную диффузию в направлении y). Этот эффект будет существенным, если

$$I_B r_6 \geq 2\varphi_T, \quad (11.16)$$

где

$$r_6 \approx \rho_6 L^2(\omega z) \quad (11.17)$$

— сопротивление активной базовой области; ρ_6 — среднее удельное сопротивление базовой области; z — ширина донной части эмиттерной области. Реальное сопротивление базовой области меньше (см. § 12.2) и падение напряжения на ней не превышает φ_T . На расстоянии y от границы эмиттерной области в интервале Δy изменение плотности базового тока равно количеству носителей, рекомбинировавших в базовой области:

$$\Delta j_6 z \omega = -j_{э} \Delta y z (1 - h'_{2Б})$$

или

$$\Delta j_B / \Delta y = -j_{\mathcal{E}} [(1 - h'_{21B}) \omega],$$

где $h'_{21B} = \gamma \kappa$ [γ — коэффициент инжекции, κ — коэффициент переноса; см. (12.18)].

Переходя к дифференциалам, получаем

$$dj_B(y) / dy = -j_{\mathcal{E}}(y) [(1 - h'_{21B}) \omega].$$

Считая, что

$$j_B = j_n + j_p \approx j_n = j_{\mathcal{E}0n} [\exp(U_{\mathcal{E}B} / \varphi_T) - 1], \quad (11.18)$$

получим

$$\frac{dj_B}{dy} = - \frac{(1 - h'_{21B})}{\omega} j_{\mathcal{E}0n} [\exp(U_{\mathcal{E}B}(y) / \varphi_T) - 1]. \quad (11.19)$$

Напряжение на эмиттерном p - n переходе связано с плотностью тока базы следующим соотношением:

$$U_{\mathcal{E}B}(y) = U_{\mathcal{E}B}(0) - \int_0^y j_B(y) \rho_6 dy. \quad (11.20)$$

Подставляя (11.20) в (11.19) и производя преобразование, получаем

$$\frac{d^2 j_B}{dy^2} + \frac{\rho_6}{q_T} j_B \left[\frac{dj_B}{dy} - \frac{(1 - h'_{21B}) j_{\mathcal{E}0n}}{\omega} \right] = 0. \quad (11.21)$$

При $U_{\mathcal{E}B} \gg \varphi_T$ (11.21) можно записать так:

$$-\frac{d^2 j_B}{dy^2} + \frac{\rho_6}{q_T} j_B \frac{dj_B}{dy} = 0. \quad (11.22)$$

Решая (11.22) при граничном условии

$$j_B(L) = 0,$$

имеем

$$j_B(y) = 2\varphi_T \lambda \operatorname{tg} \{\lambda(1 - y/L)\} (\rho_6 L), \quad (11.23)$$

где $\lambda = K\rho_6 L / (2q_T)$ и K — константа; значение λ находят из уравнения

$$\lambda \operatorname{tg} \lambda = j_B(0) \rho_6 L / (2q_T). \quad (11.24)$$

Используя соотношение

$$j_B(0) = I_{\mathcal{E}} (1 - h'_{21B})' (z\omega),$$

где $I_{\mathcal{E}}$ — эмиттерный ток, (11.24) преобразуем к виду:

$$\lambda \operatorname{tg} \lambda = I_{\mathcal{E}} L' (I_{\text{экр}} z). \quad (11.25a)$$

Ток

$$I_{\text{экив}} = 2\varphi_r \omega_i [\rho_0 (1 - h'_{21B})] \quad (11.256)$$

равен эмиттерному току, который вызывает падение напряжения, равное $2\varphi_r$, на сопротивлении базовой области при квадратной форме эмиттера ($z=L$). Подставляя уравнение (11.23) в (11.20), получаем

$$U_{\text{эб}}(y) = U_{\text{эб}}(0) - 2\varphi_r \ln \{ \cos[\lambda(1-y/L)] \cos \lambda \}. \quad (11.26)$$

Выражение для $j_{\text{э}}(y)$ определим из (11.18) с учетом (11.25а):

$$j_{\text{э}}(y) = j_{\text{э}}(0) \cos^2 \lambda \{ \cos^2 [\lambda(1-y/L)] \}. \quad (11.27)$$

Учет зависимости $j_{\text{э}} = j_{\text{э}}(y)$ удобно осуществить введением $L_{\text{эф}}$, которая определяется из следующего соотношения:

$$I_{\text{э}} = \overline{j_{\text{э}}(y)} z L = j_{\text{э}}(0) z L_{\text{эф}}, \quad (11.28)$$

где

$$\overline{j_{\text{э}}(y)} = \frac{1}{L} \int_0^L j_{\text{э}}(y) dy = j_{\text{э}}(0) \frac{\sin \lambda \cos \lambda}{\lambda}. \quad (11.29)$$

Подставляя (11.29) в (11.28), получаем

$$L_{\text{эф}} L = \sin \lambda \cos \lambda \lambda. \quad (11.30)$$

Значение λ определяется из (11.25а), поэтому при расчете соотношения (11.30), показанного на рис. 11.6,а, в качестве переменной взята величина $I_{\text{э}} L_{\text{эф}} / (I_{\text{экив}} z)$, а на рис. 11.6,б величина y/L . На рис. 11.6,а также изображены зависимости

$$I_{\text{э}} L_{\text{эф}} / (I_{\text{экив}} z) = \sin^2 \lambda \quad (11.31)$$

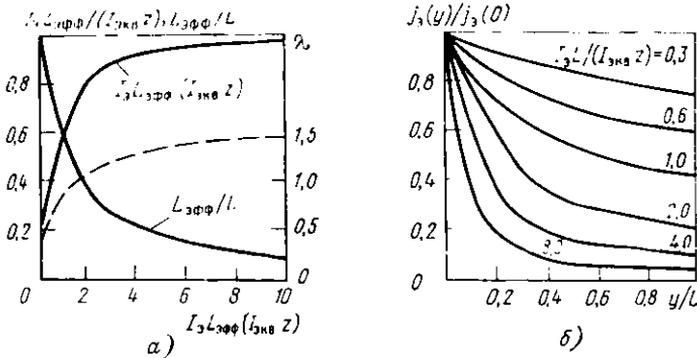


Рис. 11.6. Зависимости электрофизических параметров (а) и нормированной плотности тока от нормированной координаты (б)

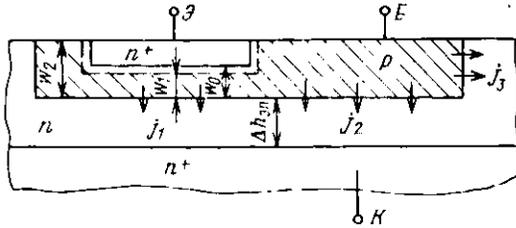


Рис. 11.7. Упрощенная структура $n-p-n$ транзистора для расчета составляющих теплового тока

и λ . Из рисунка и соотношений (11.30), (11.31) следует, что

$$L_{\text{эф}} = \begin{cases} L & \text{при } I_{\text{Э}} L (I_{\text{осн}} z) \leq 1; \\ I_{\text{осн}} z / I_{\text{Э}} & \text{при } I_{\text{Э}} L (I_{\text{осн}} z) \geq 1. \end{cases} \quad (11.32a)$$

$$(11.32b)$$

Условия (11.32) определяют степень влияния эффекта отсеснения эмиттерного тока.

11.6. ТЕПЛОВЫЕ ТОКИ $p-n$ ПЕРЕХОДОВ

Тепловые токи I_0 определяют «масштаб» вольт-амперных характеристик (ВАХ) $p-n$ переходов. На рис. 11.7 представлена упрощенная структура $n-p-n$ транзистора, где ω_1 и ω_2 — толщины активной и пассивной базовых областей. С учетом замечаний § 11.2 боковые границы эмиттерного $n-p$ перехода считались вертикальными. Также вертикальными считались боковые границы коллекторного перехода. Последнее предположение не вносит существенных ошибок в величину теплового тока $j_{\text{К106}}$. Будем также полагать, что $n-n$ переход «отражающий» для неосновных носителей; скорости поверхностной рекомбинации на границах полупроводник-металл и полупроводник — оксид равны бесконечности. В эмиттерном переходе $n-p-n$ транзистора главной составляющей плотности теплового тока ($j_{\text{ЭВ0}}$) является электронная составляющая $j_{\text{ЭВ0н}}$. Поэтому

$$j_{\text{ЭВ0н}} \approx j_{\text{ЭВ0нд}} = qn_i^2 D_n / N_T, \quad (11.33a)$$

где $D_n = q_1 \mu_n$ — коэффициент диффузии неосновных носителей в активной базовой области, а $q_1 = kT/q$ — температурный потенциал (при $T = 300$ К, $q_T = 0,026$ В).

Плотность электронного тока боковой части эмиттерного перехода

$$j_{\text{ЭВ0нб}} = qD'_n n_{p0} / L'_n, \quad (11.33b)$$

где D'_n и L'_n — переменные коэффициент диффузии и диффу-

звонная длина электронов в пассивной базовой области и n_{p0} — концентрация неосновных носителей. Предполагалось, что распределение примеси в пассивной базовой области аппроксимируется простой экспоненциальной функцией (10.10а) и значение L'_n превышает ширину пассивной базовой области в горизонтальном направлении. Подставляя (10.10а) в (11.33б), получаем

$$j_{ЭБ0nб} = \frac{qn_i^2}{N_{сб}} \sqrt{\frac{D'_n}{\tau'_n}} \exp \frac{x}{h_{0б}}. \quad (11.33в)$$

В этом выражении учтено, что $L'_n = \sqrt{D'_n \tau'_n}$, а τ'_n — время жизни неосновных носителей в пассивной базовой области. Из (11.33в) получим среднюю (по боковой границе) плотность тока:

$$\bar{j}_{ЭБ0nб} = \frac{qn_i^2 h'_{0б}}{h_3 N_{сб}} \sqrt{\frac{D'_n}{\tau'_n}} [\exp(h_3 h'_{0б}) - 1],$$

где $\sqrt{D'_n/\tau'_n}$ — среднее значение корня. При изменении x от h_3 до 0 значения D'_n и τ'_n уменьшаются и, следовательно, $\sqrt{D'_n/\tau'_n} \approx \text{const} = \sqrt{D_n/\tau_n}$ (D_n и τ_n соответствуют активной базовой области) и

$$\bar{j}_{ЭБ0nб} \approx \frac{qn_i^2 h'_{0б}}{h_3 N_{сб}} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} [\exp(h_3 h'_{0б}) - 1]. \quad (11.33г)$$

В коллекторном переходе необходимо учитывать как электронную, так и дырочную составляющие:

$$j_{КБ0} = j_{КБ0n} + j_{КБ0p}. \quad (11.34)$$

Величина $j_{КБ0nп1} = j_{ЭБ0nп1}$ (цифровые индексы соответствуют обозначениям на рис. 11.7). Кроме (11.33а) для определения $j_{КБ0nп1}$ можно использовать выражение

$$j_{КБ0nп1} = qD_n n_{p0} \{ h'_{0б} [\exp(\omega_1 h'_{0б}) - 1] \}^{-1}, \quad (11.35)$$

а для

$$j_{КБ0nп2} = q\bar{D}'_n n_{p0} \{ h'_{0б} [\exp(\omega_2 h'_{0б}) - 1] \}^{-1}, \quad (11.36)$$

где n_{p0} — равновесная концентрация неосновных носителей в базовой области на границе слоя пространственного заряда коллекторного p - n перехода, а \bar{D}'_n — значение коэффициента диффузии, соответствующее средней концентрации примесей в пассивной базовой области. При выводе выражений (11.35), (11.36) предполагалось, что распределение примесей в пассивной базовой области аппроксимируется простой экспоненциальной функцией [см. (10.10а)].

Из (10.10а) получим

$$\overline{N_6} = \frac{1}{h_{к0}} \int_0^{h_{к0}} N_6(x) dx = \frac{N_{s6} h'_{06}}{h_{к0}} [1 - \exp(-h_{к0} h'_{06})] = N_{к0} \quad (11.37)$$

а $\overline{D'_n} = D_n (N'_B)$.

С учетом (11.35) и (11.36) $j_{КБ0рд2}$ можно выразить следующим образом:

$$j_{КБ0рд2} = \frac{\overline{D'_n}}{D_n} \left[\frac{\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \right] j_{К0рд1}. \quad (11.38)$$

Для нахождения $j_{КБ0рд}$ и понимания влияния структуры слоя коллектора на характеристики биполярных транзисторов рассмотрим распределение концентрации неосновных носителей в коллекторной области транзистора (p_n).

Будем считать, что координата x отсчитывается от донной части границы слоя пространственного заряда в коллекторной области и ее расстояние до изолирующего или n - n^+ перехода равно $\Delta h_{эм}$. Тогда при отсутствии скрытого n^+ -слоя

$$p_n(x) = p_n(0) \operatorname{sh}[(\Delta h_{эм} - x) L_p] \operatorname{sh}(\Delta h_{эм} / L_p), \quad (11.39a)$$

а при его наличии

$$p_n(x) = p_n(0) \operatorname{ch}[(\Delta h_{эм} - x) L_p] \operatorname{ch}(\Delta h_{эм} / L_p). \quad (11.39б)$$

При нахождении выражений (11.39) использовались соответствующие граничные условия:

$$p_n(\Delta h_{эм}) = 0 \quad \text{и} \quad j_p(\Delta h_{эм}) = 0. \quad (11.40a), (11.40б)$$

Соотношение (11.40б) определяет свойство «отражения» неосновных носителей ступенчатым n - n^+ переходом, когда концентрация примесей в n^+ -области значительно превышает концентрацию в n -области. Дифференцируя выражения (11.39) [полагаем $p_n(0) = p_{n0} = n_i^2 / N_k$], получаем

$$j_{КБ0рд} = [q D_p n_i^2 (L_p N_k)] \operatorname{cth}(\Delta h_{эм} / L_p) \quad (11.41a)$$

при отсутствии скрытого n^+ -слоя и

$$j_{КБ0рд} = [q D_p n_i^2 (L_p N_k)] \operatorname{th}(\Delta h_{эм} / L_p) \quad (11.41б)$$

при его наличии, где D_p и L_p — коэффициент диффузии и диффузионная длина неосновных носителей-дырок в коллекторной области. В общем случае $L_p = \sqrt{D_p \tau}$, а τ — время жизни неосновных носителей. Величина

$$j_{КБ0рд} = \frac{q D_p n_i^2}{L_p N_k}. \quad (11.42)$$

При выводе соотношения (11.42) предполагалось, что расстояние от боковых частей коллекторного p - n перехода до изолирующего p - n перехода превышает L_p . Как показывают оценки, существует соотношение $j_{КБод1} > j_{КБод2} \gg j_{КОбб}$. Кроме того, $j_{КБоб} \ll j_{КБорб}$. Поэтому

$$j_{КБоб} \approx j_{КБорб}. \quad (11.43)$$

При обратных и малых прямых напряжениях на переходе определяющую роль в значении обратного тока играет ток генерации — рекомбинации, не учтенный в формулах (11.33), (11.35), (11.36), (11.38), (11.41) и (11.42).

Пример. Рассчитать плотность тепловых токов переходов n - p - n транзистора с параметрами, приведенными в § 10.3, при наличии скрытого n^+ -слоя, не используя данные примера § 11.4 при напряжении на переходах $U=0$.

Положим, что время жизни в коллекторной области $\tau_p=100$ нс, в базовой $\tau_n=50$ нс, $\Delta h_{2n}=2,6$ мкм.

Из формулы (11.7) при $N_c=10^{16}$ см⁻³ получим $\mu_p=400$ см²/(В·с). При $q_T=0,026$ В $D_p=10,4$ см²/с, $L_p=10,2$ мкм. Из табл. 11.1 и 11.2 при $U=0$ получим $\Delta h_{2p} \approx 0,1$ мкм и $\Delta h_{1p} \approx 0,18$ мкм. Тогда при $\omega_b=0,7$ мкм из (11.15) получим $N_G \approx 1,89 \cdot 10^{12}$ см⁻². Средняя концентрация примесей в активной базовой области $N_b=N_G/\omega=4,5 \cdot 10^{16}$ см⁻³, а соответствующее значение $\bar{\mu}_n \approx 650$ см²/(В·с). Тогда значение $D_n=16,9$ см²/с. Из формул (11.33) с учетом (10.106) и $h'_{об}=0,386$ мкм получим $j_{Эбод} \approx j_{Эбод1} \approx j_{КБод1} = 3,22 \cdot 10^{-10}$ А/см². Значение $j_{Эбоб} \approx j_{Эбоб1} = 0,024 \cdot 10^{-10}$ А/см². Из (11.38) получим $j_{КБод2} = 0,018 \cdot 10^{-10}$ А/см² при $N'_b=7,93 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $\mu_n=289$ см²/(В·с) и $D'_n=7,5$ см²/с. Значения из (11.41) $j_{КБорд} = 0,092 \cdot 10^{-10}$ А/см², а $j_{КБоб} \approx j_{КБорб} = 0,38 \cdot 10^{-10}$ А/см² из (11.42).

Тогда $j_{КБод1} = 3,31 \cdot 10^{-10}$ А/см², $j_{КБод2} = 0,11 \cdot 10^{-10}$ А/см².

Глава 12. ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ

12.1. СПЕЦИФИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ n - p - n ТРАНЗИСТОРОВ

Биполярные n - p - n транзисторы наиболее широко используются в биполярных микросхемах. Отличие структуры транзистора, как элемента микросхемы, от структуры дискретного транзистора приводит к различию в электрических характеристиках. На рис. 12.1 показана структура интегрального биполярного n - p - n транзистора.

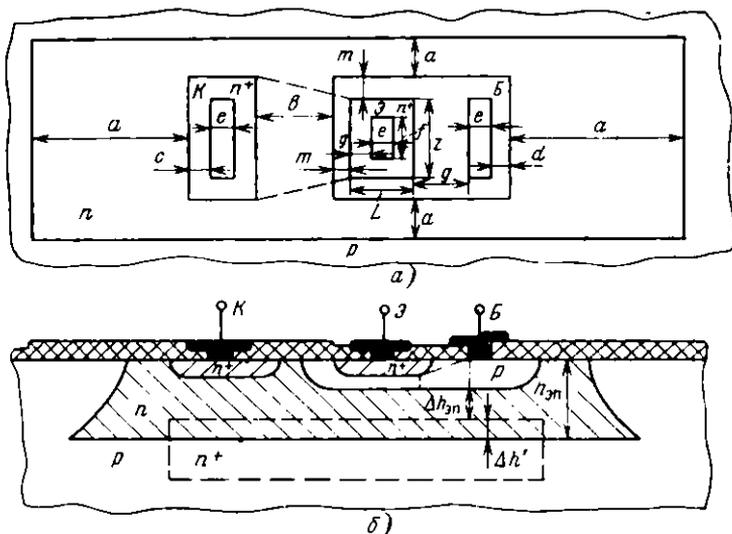


Рис 12.1. Топология (а) и структура (б) интегрального биполярного транзистора

В отличие от дискретного транзистора (см. рис. 10.2), в рассматриваемой структуре присутствует изолирующий $p-n$ переход и все выводы расположены с одной стороны подложки. Параметры диффузионных слоев и подложки определяют параметры транзисторов и других элементов (резисторов и конденсаторов), входящих в состав микросхемы. Как правило, параметры диффузионных слоев и подложки выбираются исходя из обеспечения требуемых параметров транзисторов.

Необходимость использования изолирующего $p-n$ перехода приводит к появлению паразитного $p-n-p$ транзистора (коллекторный $p-n$ переход $n-p-n$ транзистора и изолирующий $p-n$ переход) и увеличению сопротивления тела коллектора. Параметры паразитного транзистора в значительной степени влияют на параметры $n-p-n$ транзистора.

Паразитный $p-n-p$ транзистор. В микросхеме изолирующий переход должен быть закрыт, поэтому p -область полупроводниковой подложки всегда имеет минимальный потенциал в схеме (E_{min}). Это определяет режимы работы $p-n-p$ транзистора: активный, когда $n-p-n$ транзистор насыщен, или режим отсечки, когда $n-p-n$ транзистор закрыт. В последнем случае влияние $p-n-p$ транзистора сводится к увеличению коллекторной емкости $n-p-n$ транзистора на величину барьерной емкости изолирующего $p-n$ перехода $C_{из}$. Чтобы предотвратить ответвление коллекторного тока

n-p-n транзистора в *p*-слое подложки, находящейся под напряжением $E_{\text{мин}}$ (когда *n-p-n* транзистор находится в насыщении), необходимо минимизировать коэффициент передачи *p-n-p* транзистора в схеме с общей базой $h_{21Б}$. В микросхемах это обычно достигается созданием скрытого *n'*-слоя (см. штриховую линию на рис. 12.1).

Как следует из анализа выражений (11.40), (11.41), при наличии идеального *n-n'* перехода (ступенчатого и с большим перепадом концентрации донорных примесей) $h_{21Б} = 0$. Однако из-за «размытия» *n-n'* перехода в процессе термообработок (см. § 5.2) и влияния боковых частей изолирующего перехода $h_{21Б} \approx 0$.

Сопротивление тела коллектора. От сопротивления тела коллектора $r_{\text{т.к}}$ зависит быстродействие *n-p-n* транзистора и падение напряжения на нем в насыщенном состоянии

$$U_{\text{Кэнас}} = \Phi_{\text{т}} \ln \frac{h_{21БН}(1-1/S)}{1 + h_{21Э}(1-h_{21БН})S} + I_{\text{Кнас}} r_{\text{т.к}}, \quad (12.1)$$

где $S = h_{21Э} I_{\text{Б}} / I_{\text{Кнас}}$ — степень насыщения транзистора; $I_{\text{Б}}$ и $I_{\text{Кнас}}$ — его базовый и коллекторный токи. Для уменьшения сопротивления $r_{\text{кк}}$ используется скрытый *n'*-слой. Однако даже при наличии последнего обычно $r_{\text{кк}} \geq 100 \dots 150$ Ом.

Для расчета сопротивления $r_{\text{кк}}$ коллекторную область разбивают на участки простой конфигурации, для которых несложно подсчитать вносимое ими сопротивление. На рис. 12.2 представлены такие конфигурации: прямоугольный параллелепипед (*a, в, г*) с размером *b* в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка, прямая трапециевидная призма (*б*). На рисунке показаны токи, протекающие в направлении, перпендикулярном соответствующим поверхностям, и имеющие постоянную плотность. Рассчитанное с помощью разбиения на участки простой конфигурации сопротивление $r_{\text{кк}}$ имеет завышенное значение, так как предполагается, что линии коллекторного тока направлены либо перпендикулярно, либо параллельно поверхности пластины в плоскости рисунка. Сопротивление конфигурации r_0 на рис. 12.2 выражается через рассеиваемую мощность

$$r_0 I_0^2 = \int_0^l I^2(x) dr_0, \quad (12.2)$$

где I_0 — полный ток, протекающий через конфигурацию; $I(x)$ — ток, протекающий через нормальную плоскость конфигурации с координатой *x*; dr_0 — сопротивление участка конфигурации длиной *dx*. Для конфигураций рис. 12.2, *в, г* интегрирование проводится также и по оси *y*. Сопротивления конфигураций определяются следующим образом:

$$r_0 = \rho l / (kb) \quad (\text{рис. 12.2, а); (12.3а)}$$

$$r_0 = \rho l [k(b_2 - b_1)] \ln(b_2/b_1) \quad (\text{рис. 12.2, б); (12.3б)}$$

$$r_0 = \rho'(3b)(l/k + k/l) \quad (\text{рис. 12.2, в); (12.3в)}$$

$$r_0 = \rho(6b)[l(2k) + 2kl] \quad (\text{рис. 12.2, г). (12.3г)}$$

Проиллюстрируем использование соотношения (12.2) для определения сопротивления конфигурации рис. 12.2,а. Для этого выделим в последней фигуру, ограниченную плоскостями, нормальными к горизонтальной оси с координатой x и расстоянием между плоскостями Δx ($0 < x < l$). В этом случае мощность, рассеиваемая на сопротивлении такой фигуры горизонтальным током $I(x) = I_0 x/l$ и вертикальным — $I(y) = I_0 \Delta x y / (lk)$ определяется выражением

$$\Delta P(x) = \frac{I_0^2 \rho}{l^2 bk} \left(x^2 \Delta x + \frac{\Delta x}{k} \int_0^k y^2 dy \right),$$

а полная мощность, рассеиваемая конфигурацией,

$$P = I_0^2 r_0 = \frac{I_0^2 \rho}{l^2 bk} \left(\int_0^l x^2 dx + \frac{1}{k} \int_0^l dx \int_0^k y^2 dy \right).$$

Произведя интегрирование, получим выражение (12.3в).

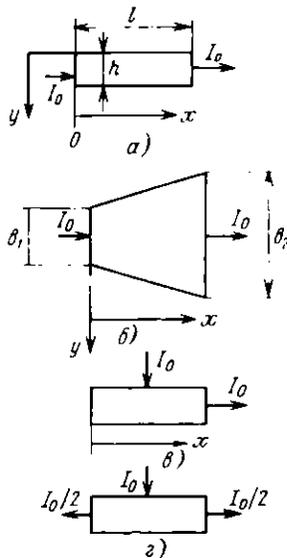


Рис. 12.2. Простейшие конфигурации для определения сопротивления тела коллектора ($h = k$)

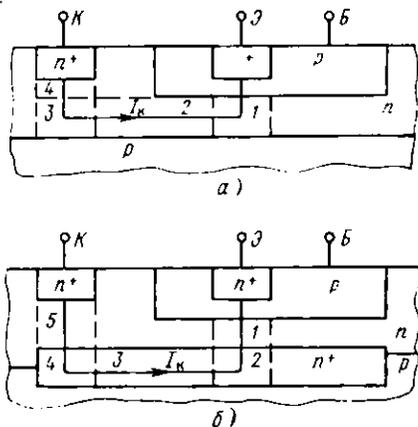


Рис. 12.3. Структура $n-p-n$ транзистора для расчета сопротивления тела коллектора без n^+ -слоя (а) и с n^+ -слоем (б)

Пример. Рассчитать сопротивление тела коллектора при отсутствии и наличии скрытого n^+ -слоя. Будем полагать, что транзистор имеет структуру, показанную на рис. 12.1 при следующих значениях параметров: $f=e$, $b=n$, $m=c$, $g=d=4$ мкм, $z=L=q=12$ мкм; $\Delta h_{2n}=3$ мкм; $\Delta h'=3$ мкм; $\rho_{K1-3}=0,5$ Ом·см; удельное сопротивление скрытого n^+ -слоя $R_s=10$ Ом/□ (см. § 11.4); глубины залегания эмиттерного и коллекторного переходов равны 2 и 3 мкм соответственно. Будем считать боковые стенки диффузионных областей вертикальными.

Скрытый n^+ -слой отсутствует. Разобьем область прохождения коллекторного тока на четыре участка ($I-I$ на рис. 12.3а). Сопротивление $r_{KK}=r_{01}+r_{02}+r_{03}+r_{04}$. Первый участок [см. (12.3а)] имеет $r_{01}=590$ Ом, второй [см. (12.3б)] и штриховые линии (рис. 12.1,а) — $r_{02}=1280$ Ом, третий [см. (12.3в)] — $r_{03}=350$ Ом; четвертый [см. (12.3а)] $r_{04}=20$ Ом. Сопротивление $r_{KK}=2,21$ кОм.

Имеется скрытый n^+ -слой. Разобьем область прохождения коллекторного тока на пять участков ($I-5$ на рис. 12.3б). Первый участок (12.3б) имеет $r_{01}=80$ Ом, второй (12.3в) — $r_{02}=2$ Ом, третий (12.3а) — $r_{03}=8$ Ом, четвертый (12.3в) — $r_{04}=2$ Ом, пятый (12.3а) — $r_{05}=83$ Ом. Сопротивление $r_{KK}\approx 175$ Ом.

Из примера следует, что использование скрытого n^+ -слоя позволило уменьшить сопротивление тела коллектора в 15 раз.

Даже при использовании скрытого n^+ -слоя $r_{KK}>100$ Ом (для транзистора с минимальными размерами, см. табл. 11.1). Для его уменьшения, как видно из рис. 12.4, контакт к коллектору можно осуществлять не только с одной из боковых сторон, но и с обеих противоположных сторон коллекторного перехода, полностью охватывая его (штриховые линии) или иметь Г- или П-образную форму. Минимальное значение r_{KK} имеет транзистор с контактом к коллектору, полностью охватывающим его. При этом его сопротивление r_{KK} приблизительно в 4 раза меньше, чем для структуры на рис. 12.1. В основном значения r_{KK} определяются областями, находящимися вне скрытого n^+ -слоя (см. пример этого п.). Их сопротивление определяется соотношениями (12.3,а,б) при трапециевидальном разбегении скрытого n^+ -слоя, показанном на рис. 12.4 штриховыми линиями.

Напряжение пробоя. Этот параметр для отдельно взятых p - n переходов рассмотрен в § 11.3. Для транзисторов, особенно с тонкой базой (характерной при интегральном исполнении), имеется еще

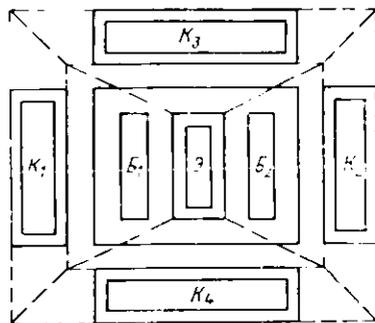


Рис. 12.4 Топология p - n - p транзистора с уменьшенными сопротивлениями базовой области и тела коллектора

одни механизм пробоя между коллектором и эмиттером. Он связан с увеличением $h_{21Б}$ благодаря лавинному умножению носителей в коллекторном переходе и уменьшению толщины базовой области при увеличении запирающего смещения на коллекторном переходе. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ) при коэффициенте передачи $h_{21Б} = 1$, т. е. при $h_{21Э} = \infty$ (коэффициент передачи в схеме с общим эмиттером) происходит пробой. Напряжение пробоя

$$U_{КЭ\text{проб}} = U_{КБ\text{проб}} \sqrt[n]{1 + \overline{h_{21Э}}}, \quad (12.4)$$

где $U_{КБ\text{проб}}$ — напряжение пробоя коллекторного перехода; $n = 5$ для базовой n -области и $n = 3$ для p -области.

Пример. Рассчитать напряжение пробоя $U_{КЭ\text{проб}}$ транзистора с параметрами $\omega_0 = 0,7$ мкм, $U_{КБ\text{проб}} \approx 40$ В и $h_{21Э} \approx 100$ (см. пример § 12.3).

Из выражения (12.4) при $n = 3$ получим $U_{КЭ\text{проб}} = 8$ В, т. е. по сравнению с напряжением $U_{КБ\text{проб}}$ напряжение пробоя коллектор — эмиттер приблизительно в 5 раз меньше.

Частотные характеристики. В частотные характеристики интегрального транзистора вносят вклад структурные области. Частотная характеристика коэффициента передачи эмиттерного тока

$$h_{21Б}(\omega) = h_{21Б0} \exp(-i m \omega \omega_{h_{21Б}}) (1 + i \omega \omega_{h_{21Б}}), \quad (12.5)$$

где $\omega_{h_{21Б}}$ — граничная частота, при которой $|h_{21Б}(\omega)| = 0,7 h_{21Б0}$, m — определяет дополнительный фазовый сдвиг при $\omega = \omega_{h_{21Б}}$; $i = \sqrt{-1}$. Постоянная времени коэффициента передачи приблизительно может быть представлена как

$$\tau_{h_{21Б}} = 1/\omega_{h_{21Б}} = \tau_a + \tau_{np} + \tau_{0,c} + \tau_b, \quad (12.6)$$

где τ_a — постоянная времени эмиттерного перехода; τ_{np} — постоянная времени пролета носителей через базовую область; $\tau_{0,c}$ — постоянная времени, определяющая пролет носителей через обедненный слой; τ_b — постоянная времени коллекторного перехода. Эти величины определяются следующим образом:

$$\tau_a = r_a C_a + (\varphi_T / I_E) C_a, \quad (12.7a)$$

где C_a — барьерная емкость; r_a — дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$$\tau_{np} = \frac{1}{D_n} \int_0^w \left(\frac{1}{N} \int_{x'}^w N dx' \right) dx', \quad (12.7b)$$

где D_n — средний коэффициент диффузии неосновных носителей; N — результирующая концентрация примесей в базовой области (см. рис. 10.3).

Время пролета носителей через объединенный слой коллекторного перехода со скоростью $V_{0,c}t_{0,c} = \Delta h_k / V_{0,c}$ ($V_{0,c} \approx 10^7$ см/с), а соответствующая постоянная времени

$$\tau_{0,c} = \Delta h_k / 2V_{0,c}, \quad \tau_k = r_{kk} (C_k + C_{из}), \quad (12.7в), (12.7г)$$

где r_{kk} — сопротивление тела коллектора; C_k и $C_{из}$ — барьерные емкости коллекторного и изолирующего переходов. Емкость изолирующего перехода, подключенная параллельно барьерной емкости коллекторного перехода, ухудшает временные характеристики транзисторов. Обычно в интегральных транзисторах $\tau_{0,c}$ существенно меньше $\tau_{пр}$ и τ_k , а $\tau_k > \tau_{пр}$.

В *n-p-n* транзисторах с тонкой базовой областью из-за влияния тормозящего поля вблизи эмиттерного перехода можно полагать, что

$$\tau_{пр} \approx t_d = \omega^2 / 2D_n, \quad (12.8)$$

где t_d — среднее время диффузии носителей.

Из анализа выражений (12.6)–(12.8) следует, что при малом токе эмиттера $t_{h_{21Б}} \sim \tau$, и $\omega h_{21Б}$ прямо пропорционально I_E . При достаточно большом значении I_E получается $t_{h_{21Б}} = \tau_{пр} + \tau_{0,c} + \tau_k = \text{const}$. Однако при дальнейшем увеличении тока I_E происходит уменьшение толщины слоя пространственного заряда коллекторного перехода из-за уменьшения напряжения на коллекторном переходе (это уменьшение вызвано падением напряжения на сопротивлении тела коллектора) и $t_{h_{21Б}} \approx \tau_k$:

$$f_{h_{21Б}} = 1 / 2\pi t_{h_{21Б}}. \quad (12.9)$$

Таблица 12.1. Электрические параметры *p-n* переходов

| Переходы | Удельное сопротивление областей коллектора, Ом·см | | | | | | |
|-----------------------|---|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-----|
| | 0.1 | | 0.5 | | 1.2 | | |
| | C_0 , пФ·мм ² | $U_{проб.}$, В | C_0 , пФ·мм ² | $U_{проб.}$, В | C_0 , пФ·мм ² | $U_{проб.}$, В | |
| Эмиттер — база: | боковая часть | 1000 | 7 | 1000 | 7 | 1000 | 7 |
| | донная часть | 600 | 7 | 450 | 7 | 350 | 7 |
| База — коллектор | 350 | 25 | 200 | 50 | 150 | 70 | |
| Коллектор — подложка: | боковая часть | 250 | 35 | 150 | 70 | 100 | 100 |
| | донная часть | 100 | 35 | 100 | 70 | 100 | 100 |

Для приближенных оценок барьерных емкостей переходов, а следовательно, и быстродействия можно использовать табл. 12.1,

построенную для $R_{сз} = 2 \dots 3 \text{ Ом}/\square$, $R_{сб} = 200 \text{ Ом}/\square$, сопротивление пластины p -типа $\rho_p = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $h_s = 2,3 \text{ мкм}$, $h_k = 2,7 \text{ мкм}$ и толщины эпитаксиальной пленки $h_{эп} = 12,5 \text{ мкм}$. Эту таблицу можно использовать и при параметрах структуры микросхемы, отличных от указанных.

Пример. Рассчитать значения $\tau_{h_{21Б}}$ и $f_{h_{21Б}}$ для транзистора со структурой, показанной на рис. 12.1, при напряжении коллектор — база $U_{КБ} = -1 \text{ В}$ и с размерами, приведенными в примере § 12.1. Примем $h_{эл} = 10 \text{ мкм}$; $a = 18 \text{ мкм}$; $r_{ок} = 100 \text{ Ом}$, $I_K = I_{Э} = 1 \text{ мА}$ и $r_s = 26 \text{ Ом}$; $D_n = 18,2 \text{ см}^2/\text{с}$ (см. пример § 11.5); $V_{те} = 10^7 \text{ см}^2/\text{с}$; $\rho_k = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; $\omega_0 = 0,7 \text{ мкм}$; $h_s = 1,7 \text{ мкм}$; $\Delta h_{эп} = 0$. Воспользуемся данными примерами § 11.4. Исходя из заданных геометрических размеров структуры и данных табл. 12.1 примем $C_{сз} = 0,15 \text{ пФ}$ и $C_{сб} = 1,1 \text{ пФ}$.

Из выражения (12.7а) имеем $\tau_s = 4 \text{ пс}$. Из табл. 11.2 при $U_{КБ} = -1 \text{ В}$ получим $\Delta h_{эп} = 0,23 \text{ мкм}$ и $\Delta h_{сн} = 0,43 \text{ мкм}$. Тогда $\omega = 0,47 \text{ мкм}$. Из соотношения (12.8) $\tau_{нр} = 65 \text{ пс}$. Из выражения (12.7в) $\tau_{о.с} \approx 3 \text{ пс}$, а из (12.7г) $\tau_k = 133 \text{ пс}$.

Из соотношений (12.6) и (12.9) $\tau_{h_{21Б}} = 0,205 \text{ нс}$ и $f_{h_{21Б}} \approx 780 \text{ МГц}$.

12.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ n-p-n ТРАНЗИСТОРОВ

Выбор геометрических размеров транзисторов, количество эмиттеров, базовых и коллекторных контактов и их форма определяются требованиями к параметрам. Максимальная плотность эмиттерного тока, превышение которой приводит к уменьшению коэффициента усиления транзистора, ограничивает рабочий ток. Определение размеров эмиттерной области, а следовательно, и топологии транзистора проводится исходя из обеспечения максимального коэффициента усиления при рабочем токе эмиттера.

Расчетные соотношения для определения геометрических размеров эмиттерной области. Модуляция проводимости базовой области транзистора приводит к изменению коэффициента передачи и сопротивления $r_{сб}$. Степень модуляции проводимости зависит от уровня инжекции

$$\delta = n_p / p_{p0} | x = 0, \quad (12.10)$$

где n_p и p_{p0} (см. рис. 10.3) — концентрация неосновных и равновесная концентрация основных носителей на границе обедненного слоя эмиттерного перехода в базовой области.

Коэффициент передачи тока

$$h_{21Э} = h_{21Б} (1 - h_{21Б}) \quad (12.11)$$

достигает максимального значения при

$$\delta \approx 1. \quad (12.12)$$

Если $\delta \gg 1$ (высокий уровень инжекции), то $h_{21Э}$ уменьшается.

Выполнение условия (12.12) при максимальном рабочем эмиттерном токе обеспечивает работу схемы при максимальном значении $h_{21Э}$.

Максимальная плотность эмиттерного тока, превышение которой приводит к переходу к высокому уровню инжекции, определяемая условием (12.12), находится из выражения

$$j_{Э, \text{ли}} = q D_n \bar{N}_0 \omega, \quad (12.13a)$$

где \bar{N}_0 соответствует некоторой фиктивной концентрации n_p при диффузионном механизме переноса носителей. При наступлении высокого уровня инжекции без действия эффекта оттеснения [см. (11.33a)]

$$j_{Э, \text{ли}} = q D_n N_p' \omega^2. \quad (12.13б)$$

Учитывая, что $D_n = \mu_n / \mu_p$, получим из (12.13б)

$$j_{Э, \text{ли}} = F \varphi_r (\rho_0 \omega), \quad (12.13в)$$

где $F = \mu_n / \mu_p$ ($F \approx 2,3$). Эмиттерный ток при переходе к высокому уровню инжекции (см. рис. 11.6)

$$I_{Э, \text{ли}} = FLz \varphi_r (\rho_0 \omega). \quad (12.13г)$$

При наступлении высокого уровня инжекции под действием эффекта оттеснения из (11.32б) с учетом (11.28) получим эмиттерный ток:

$$I_{Э, \text{ли}} = z \int \bar{j}_{Э, \text{ли}}(0) I_{Э, \text{ли}}. \quad (12.13д)$$

Так как в данном случае переход к высокому уровню инжекции происходит при $y=0$, из (12.13г) получим $\bar{j}_{Э, \text{ли}}(0)$. Подставляя это выражение в (12.13д), с учетом (11.25) имеем

$$I_{Э, \text{ли}} = (\varphi_r z \rho_0) \sqrt{2(1 - h'_{21Э})}. \quad (12.13е)$$

Используя (11.25б), (11.32) и (12.13е), получаем формулы для определения максимального удельного (на единицу ширины эмиттера z) тока для произвольного случая

$$\frac{I_{Э, \text{ли}}}{z} \begin{cases} F \varphi_r L (\rho_0 \omega) & \text{при } \psi \geq 1, \\ (\varphi_r \rho_0) (2Fh'_{21Э, \text{max}})^{1/2} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.14а)$$

где $I_{Э, \text{ли}}$ — эмиттерный ток, превышение которого вызывает переход к высокому уровню инжекции; $h'_{21Э, \text{max}} = 1/(1 - h'_{21Э, \text{max}})$ — максимальное значение коэффициента передачи тока [при $h_{21Э, \text{max}} \approx 1$ значение $h'_{21Э, \text{max}} \approx h_{21Э, \text{max}}$, а $h'_{21Э} = \gamma z$, см. § 11.5 и (12.18)], при котором выполняется условие (12.12);

$$\psi = (\omega' L) (2h'_{21Э, \text{max}} F)^{1/2}. \quad (12.14б)$$

При $\psi < 1$ свад $h_{21Э}$ с увеличением эмиттерного тока происходит из-

за перехода к высокому уровню инжекции, вызванному действием эффекта оттеснения, а при $\psi > 1$ — из-за перехода к высокому уровню инжекции без действия эффекта оттеснения. Как видно из рис. 10.2 и 11.6,б, при $\psi < 1$ рабочей или «активной» является правая часть эмиттера, ближайшая к базовому контакту.

На рис. 12.5 представлена зависимость $h'_{21Э\max}$ от L/w , соответствующая условию $\psi = 1$. Область, находящаяся выше кривой, определяет действие уравнения (12.14а), а ниже — (12.14б). Для определения размеров эмиттерной области с помощью соотношений (12.14), при выбранных параметрах диффузионного процесса и полупроводниковой пластины необходимо найти $h'_{21Э\max}$.

Зависимость коэффициента передачи от тока I_K (или $I_{Э}$) в рабочей области имеет сложную аналитическую форму. Ее можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$h_{21Э} \approx (K_1 + K_2 I_K^{1/2} + K_3 I_K)^{-1}, \quad (12.15)$$

где K_1 , K_2 и K_3 — постоянные, обычно находящиеся из экспериментальных данных. Максимальное значение $h_{21Э\max}$ соответствует $I_K = (K_2/K_3)^2$. Если допустимая величина $h_{21Э} < h_{21Э\max}$ при максимальном рабочем токе, т. е. возможно $\delta > 1$, то можно использовать меньшие размеры эмиттерных областей. Соответствующая оценка уменьшения $h_{21Э}$ может быть произведена с помощью (12.15).

Пример. Рассчитать ширину эмиттера транзистора (см. рис. 12.1), работающего при максимальном токе $I_{Э} = 4$ мА и при $h_{21Э} = 70$; $\omega = 0.7$ мкм; $L = 12$ мкм; $\rho_6 = 0.2$ Ом·см; $F = 2.3$.

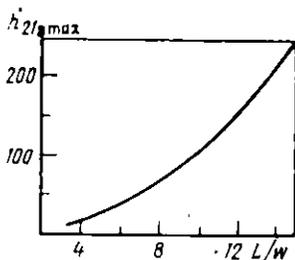


Рис. 12.5. Кривая, определяющая механизм наступления высокого уровня инжекции при $\psi = 1$.

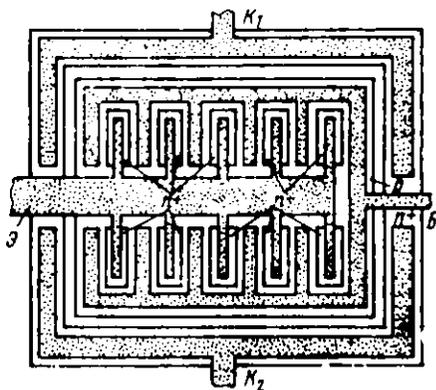


Рис. 12.6. Топология мощного биполярного *p-n-p* транзистора

Из рис. 12.5 видно, что при $L/w=17$ необходимо использовать соотношение (12.14б). Откуда $I_{Э\text{наб}}/z=0,234$ мА/мкм. Для заданного $I_{Э}$ получим $z\approx 17$ мкм.

Геометрия транзисторов. При выборе геометрии транзистора необходимо учитывать как электрические характеристики разрабатываемого прибора, так и характеристики технологического процесса и допуски на геометрические размеры. Обычно у интегральных транзисторов $\psi < 1$ (12.14б), т. е. высокий уровень инжекции наступает из-за действия эффекта оттеснения эмиттерного тока.

Геометрические размеры маломощных транзисторов ($I_K \leq 1$ мА) с высоким быстродействием необходимо минимизировать с целью уменьшения емкостей эмиттерного, коллекторного и изолирующего переходов. Эти транзисторы обычно имеют структуру, показанную на рис. 12.1. Длина эмиттера L выбирается минимальной для уменьшения влияния эффекта оттеснения эмиттерного тока. Транзисторы с коллекторными токами до 10 мА обычно имеют структуру с двумя базовыми контактами, показанную на рис. 12.4. В этом случае, при использовании соотношений (12.14) в (12.14в) величина L заменяется на $L/2$, так как «активными» являются обе стороны эмиттера, находящиеся вблизи базовых контактов. Поэтому в отличие от структуры с одним базовым контактом, в рассматриваемом транзисторе ($\psi < 1$) значение z будет в два раза меньше (при одинаковых I_K), т. е. будет в два раза меньше площадь эмиттера. Если справедливо соотношение (12.14а), то в нем, независимо от количества базовых контактов, фигурирует полная длина эмиттера.

В мощных транзисторах (I_K — десятки миллиампер) для минимизации занимаемой площади особое значение получает максимальное отношение «активной» части периметра эмиттеров к площади эмиттеров. Поэтому мощные транзисторы имеют полосковую структуру, состоящую из нескольких эмиттеров и базовых контактов, соединенных параллельно (рис. 12.6).

В эмиттерах, имеющих большую ширину z , необходимо опенить падение напряжения на его контактной площадке. Оно не должно превышать φ_T (12.13а), так как в противном случае периферийные участки эмиттера будут инжектировать меньший ток, чем участки, ближайшие к внешней части электрода. Это ухудшает электрические характеристики транзистора (уменьшение $h_{21Э}$, $f_{h_{21Э}}$). Поэтому иногда целесообразно разбивать эмиттер на части, как показано на рис. 12.6.

Пример. Рассчитать ширину эмиттера транзистора со структурой, изображенной на рис. 12.4 при $\psi=1$, $w=0,7$ мкм, $l=12$ мкм, $\rho_b=0,2$ Ом·см. Транзистор работает при максимальном токе 6 мА.

Из соотношения (12.14в), подставляя вместо L значение $L/2$, получаем $h_{21Э} = 85$ при $\psi = 1$. Из выражения (12.14а) имеем $I_{Энн} = 0,506$ мА/мкм [в (12.14а) подставлялось значение L]. Тогда ширина $z \approx 12$ мкм. Из соотношения (12.11б) получим $I_{Энн}/z = 0,25$ мА/мкм. С учетом того, что «активными» являются обе стороны эмиттера (ближайшие к базовым контактам), получаем $z \approx 12$ мкм. Как и следовало ожидать, при $\psi = 1$ формулы (12.14а,б) дают одинаковый результат. Для структуры с одним базовым контактом (рис. 12.1) при $L = 12$ мкм значение $\psi = 0,5$. Поэтому для нее выбирается ширина эмиттера $z = 24$ мкм.

Сопротивление базовой области. При расчете сопротивления базовой области r_b структуру разбивают на области, сопротивление которых легко определяется [см. рис. 12.2 и 12.3]. Однако в отличие от $r_{кк}$ сопротивление r_b зависит от эмиттерного тока или от уровня инжекции. Последний модулирует проводимость части базовой области, находящейся под основанием эмиттера $r_{б1}$ (рис. 12.2,в). При определении $r_{б1}$ в выражениях (12.3в, 12.3г) следует опустить правое слагаемое в скобках. Уравнение для определения сопротивления этого участка базовой области транзистора с конфигурацией, показанной на рис. 10.2, в зависимости от эмиттерного тока имеет вид [см. (11.23), (12.2)]

$$r_{б1} = \frac{r_0}{z\omega t g^2 \lambda} \int_0^L t g^2 \left[\lambda \left(1 - \frac{y}{L} \right) \right] dy,$$

где $\lambda t g \lambda = I_{Э} L / I_{кв}$; $I_{кв}$ — некоторый эквивалентный ток $I_{кв} = 2q r_0 \omega / [\rho_0 (1 - h_{21Б})]$.

Произведя интегрирование, получим

$$r_{б1} = r_0 (t g \lambda - \lambda) (\lambda t g^2 \lambda), \quad (12.16а)$$

где $r_0 = \rho_0 L / (z\omega)$ — сопротивление базовой области под нижней частью эмиттера. При $\lambda \rightarrow 0$, т. е. при токе $I \rightarrow 0$ выражение (12.16) имеет вид:

$$r_{б1} = r_0 / 3. \quad (12.16б)$$

Из сравнения (12.3в) и (12.16б) видно, что, как и следовало ожидать, выражения для определения сопротивления областей совпадают.

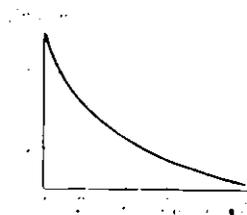


Рис. 12.7. Зависимость нормированного сопротивления базовой области $n-p-n$ транзистора от параметров транзисторной структуры

На рис. 12.7 показана зависимость нормированного сопротивления $r_{б1}$ от структурных и электрических характеристик. При заданных параметрах транзисторной структуры с помощью этой зависимости можно определить сопротивление части базовой области $r_{б1}$. Учет сопротивления периферийных участков базовой области ($r_{б2}$) с помощью соотношений (12.3) позволяет найти $r_б = r_{б1} + r_{б2}$. Для структуры транзистора с двумя базовыми контактами соотношение (12.16а) по аналогии с (12.13в, г) запишем как

$$r_{б1} = r_б (\lg \lambda - \lambda) / (4 \lambda \lg^2 \lambda). \quad (12.17)$$

Как видно из рис. 12.1, 12.4 и выражений (12.16а), (12.17) использование транзистора с двумя базовыми контактами позволяет в 2...4 раза уменьшить значение $r_б$ по сравнению с сопротивлением в структуре с одним базовым контактом. Для уменьшения $r_б$ в некоторых случаях используют Г-образный контакт к базовой области, охватывающий одну из торцевых частей эмиттера, или П-образный.

Пример. Рассчитать сопротивление базовых слоев для структур рис. 12.1 и 12.4 при следующих значениях параметров: $h_{21Э} = 70$, $\Delta h_{np} = 0$; $\Delta h_{np} = 0,3$ мкм; $f = e = d = b = m = c = g = 4$ мкм; $z = L = q = 12$ мкм; $h_б = 1$ мкм; $h_к = 2$ мкм; удельное сопротивление слоя базы $R_s = 200$ Ом/□; $\rho_б = 0,2$ Ом·см; диапазон изменения токов $0 < I_Э \leq I_{Э \max} = 3$ мА.

В структуре с одним базовым контактом разобьем область базы на три участка: прямоугольная призма под основанием эмиттера $r_{б1} = r_{б1}$ (12.3в); трапециевидальная призма $r_{б2}$ (12.3б) (штрихпунктирная линия на рис. 12.1,б) и прямоугольная призма под базовым контактом $r_{б3}$ (12.3в) ($r_{б2} = r_{б2} + r_{б3}$). Сопротивление $r_{б1} \approx 950$ Ом. Для определения $r_{б2}$ и $r_{б3}$ используем значение ρ , усредненное по базовому диффузионному слою: $\rho = R_s (h_к - \Delta h_{np}) = 0,034$ Ом·см. Значения $r_{б2} \approx 300$ Ом и $r_{б3} \approx 26$ Ом. Суммарное сопротивление $r_б \approx 1300$ Ом при $I_Э \ll 3$ мА. Для нахождения сопротивления $r_б$ при токе $I_Э \approx I_{Э \max}$ воспользуемся рис. 12.7. Значение $I_Э I / (I_{Э \max} z) = 1,4$, а $r_{б1} \approx 665$ Ом. Тогда, $r_б = 990$ Ом. Для структуры с двумя базовыми контактами $r_б = [r_{б1} + 2(r_{б2} + r_{б3})] / 4$. При $I_Э \ll I_{Э \max}$ значение $r_б \approx 400$ Ом, а при $I_Э = I_{Э \max}$ сопротивление $r_б = 330$ Ом.

12.3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ *n-p-n* ТРАНЗИСТОРА

Статический коэффициент передачи эмиттерного тока $h_{21Б}$ и коэффициент передачи $h_{21Э}$ являются одними из основных параметров транзистора и определяют не только схемные, но и структурные особенности транзистора (см. § 12.2). Коэффициент

$$h_{21Б} = \gamma^* \gamma_k, \quad (12.18)$$

где γ^* — эффективный коэффициент инжекции, определяющий долю электронного тока эмиттера инжектируемого донной частью эмиттера в активную базовую область в полном электронном токе эмиттера (электроны, инжектируемые эмиттером в горизонтальном направлении, рекомбинируют в пассивной базовой области, увеличивая базовый ток); γ — коэффициент инжекции эмиттерного $p-n$ перехода; κ — коэффициент переноса.

Обычно температурный коэффициент коэффициента передачи тока, $\%/K$

$$TK h_{21Э} = (1/h_{21Э}) \partial h_{21Э} / \partial T = 0,5.$$

Статический коэффициент передачи при нормальном включении. Для определения γ^* воспользуемся предположениями § 11.6 и выражениями (11.33а) и (11.33г). Величина

$$\begin{aligned} \gamma^* &= j_{ЭБонд} A_{Э,д} / (j_{ЭБонд} A_{Э,д} + j_{ЭБонб} A_{Э,б}) = \\ &= [1 + A_{Э,б} j_{ЭБонб} / (A_{Э,д} j_{ЭБонд})]^{-1}, \end{aligned} \quad (12.19а)$$

где $A_{Э,б}$ и $A_{Э,д}$ — площади боковой и донной частей эмиттерного перехода. Тогда

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + \frac{A_{Э,б} h'_{00} N_{\Gamma}}{A_{Э,д} h_0 N_{Эб} L_n} [\exp(h_0/h'_{00}) - 1], \quad (12.19б)$$

где L_n — диффузионная длина неосновных носителей в активной базовой области.

Обычно коэффициент инжекции имеет вид:

$$\gamma \approx 1 - D_p N_{\Gamma} / (D_n N_{Э}),$$

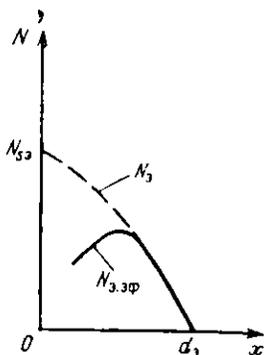


Рис. 12.8. Характер зависимости эффективной концентрации донной примеси в эмиттере $n-p-n$ транзистора

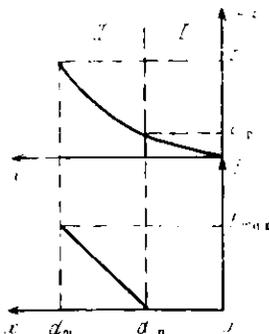


Рис. 12.9. Аппроксимация напряженности электрического поля и концентрации неосновных носителей в эмиттере $n-p-n$ транзистора ($d_{0c} = h_0$, $d_{rp} = h_{rp}$)

где D_p — средний коэффициент диффузии дырок в эмиттере; N_{Σ} — удельное количество донорной примеси в эмиттере. Однако в нем не учитываются эффекты, связанные с сильным легированием эмиттера, такие как сужение ширины запрещенной зоны и ожерембиация.

На рис. 12.8 качественно показан учет этих эффектов введением некоторой эффективной концентрации $N_{\Sigma \text{эф}}$ вместо N_{Σ} . Однако для получения аналитического выражения γ целесообразно представить его в виде

$$\gamma = j_{\Sigma \text{вон}} (j_{\Sigma \text{вон}} + j_{\Sigma \text{вор}}), \quad (12.20)$$

где $j_{\Sigma \text{вон}}$ и $j_{\Sigma \text{вор}}$ — соответствующие тепловые токи. Значение $j_{\Sigma \text{вон}}$ определяется (11.33а). Для нахождения $j_{\Sigma \text{вор}}$ воспользуемся следующими предположениями, иллюстрируемыми рис. 12.9. На рисунке представлены аппроксимации распределения концентрации основных носителей и напряженности электрического поля в эмиттере ($h_{0,c}$ — граница слоя пространственного заряда). Из рисунка видно, что эмиттер можно разбить на две области (граница раздела определяется h_{rp}). В первой — поле отсутствует, и концентрация основных носителей — линейна (предполагалось, что скорость поверхностной рекомбинации равна бесконечности). Во второй области линейно поле. Для эмиттера n -типа при распределении примесей, определяемом (10.86),

$$h_{rp} = h_{0,c} \sqrt{\ln(10^{-17} N_{\Sigma}) - \sqrt{555} \varphi_r} \quad (12.21a)$$

$$\text{и } E_{\text{max}} = \frac{2\varphi_r h_{0,c}}{h_{rp}^2} \{1 - (1,8 \cdot 10^{-3} \varphi_r) [\ln(10^{-17} N_{\Sigma})]^2\}, \quad (12.21б)$$

где N_{Σ} — концентрация донорной примеси в точке $h_{0,c}$. Считая, что в области II (рис. 12.9)

$$E = K'(x - h_{rp}), \quad (12.21в)$$

а $K' = E_{\text{max}} / (h_{0,c} - h_{rp})$, уравнение непрерывности (10.2) для стационарного случая, пренебрегая малыми величинами, записываем в виде:

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - K(x - h_{rp}) \frac{dp_n}{dx} - Kp_n = 0,$$

где $K = K' / q_r$. Решение этого уравнения получим в виде:

$$p_n(x) = \exp[K(x - h_{rp})^2/2] [C_1 + C_2] \int \exp[-K(x - h_{rp})^2/2] dx.$$

Чтобы получить аналитическое выражение для $p_n(x)$, разложим в ряд Тейлора относительно h_{rp} функцию $\exp[-K(x - h_{rp})^2/2]$. Как показывают оценки, можно ограничиться семью членами:

$$\exp[-K(x-h_{rp})^2/2] \approx x + \sum_{i=1}^6 (-1)^i L_i (x-h_{rp})^{2i+1}. \quad (12.22a)$$

Значения

$$L_1 = K/2!; \quad L_2 = 3K^2/4!; \quad L_3 = 15K^3/6!; \quad L_4 = 105K^4/8!; \\ L_5 = 945K^5/10!; \quad L_6 = 10395K^6/12!. \quad (12.22б)$$

Выражение для p_n в области II найдем при следующих граничных условиях:

$$p_n(h_{o.c}) = p_{o.c}; \quad j_p^1(h_{rp}) = j_p^2(h_{rp}),$$

где j_p^1 и j_p^2 — дырочные токи в областях I и II. Величина

$$j_p^1(x) = j_p^1(h_{rp}) = qD_p^1 p_{rp}/h_{rp},$$

а D_p^1 — среднее значение коэффициента диффузии в области I. Обозначим

$$G'(x) = \sum_{i=1}^6 (-1)^i L_i \frac{(x-h_{rp})^{2i+1}}{2i+1},$$

$$G(x) = D_p^2 \exp[-K(x-h_{rp})^2/2] \{D_p^2 - D_p^1 + (D_p^1/h_{rp}) [x + G'(x)]\}, \quad (12.22в)$$

где D_p^2 — среднее значение коэффициента диффузии в области II. Тогда

$$p_n(x) = p_{rp}, \quad G(x) = p_{o.c} G(h_{o.c})/G(x). \quad (12.23a)$$

Подставив в (10.5) выражение (12.21в) и (12.23a), получим

$$j_{ЭВР}(x) = -qp_{o.c} \{ \mu_p^2 E_{max} - G(h_{o.c}) \{ K(x-h_{rp}) [D_p^2 G(x)] + \\ + D_p^1/h_{rp} \} \}, \quad (12.23б)$$

а μ_p^2 — подвижность дырок в области II. Значение $j_{ЭВР}$ получается из (12.23б) при $p_{o.c} = n^2_i/N_{до}$ и $x = h_{o.c}$. Для получения приближенных значений γ можно считать $h_{o.c} = h_3$, а за $N_{до}$ принимать значение концентрации доноров или акцепторов в точке h_3 . Для нахождения μ_p^2 и D_p^2 можно использовать соотношение (11.7). При среднем значении концентрации примесей в области II, равном \bar{N}_3^2 , D_p^1 находится из выражения

$$D_p^1 = 480 \varphi_T \sqrt{1 + 350 \cdot 10^{20} / (\bar{N}_3^2 + 1 \cdot 10^{19})}, \quad (12.24a)$$

где \bar{N}_3^1 — среднее значение концентрации в области I.

Для получения значений \bar{N}_3^1 и \bar{N}_3^2 воспользуемся простой экспоненциальной аппроксимацией распределения примесей в областях I и II. Тогда

$$\bar{N}_3^1 = N_{св} h_{0c}^1 h_{rp} [1 - \exp(-h_{rp} h_{0c}^1)], \quad (12.24б)$$

$$\bar{N}_3^2 = [N_{rp} h_{0c}^2 (h_{o.c} - h_{rp})] \{1 - \exp[-(h_{o.c} - h_{rp}) h_{0c}^2]\},$$

а

$$h_{0c}^1 = h_{rp} \ln(N_{св}/N_{rp}), \quad (12.24в)$$

$$h_{0c}^2 = (h_o - h_{rp}) \ln(N_{rp}/N_{до}).$$

Коэффициент переноса определяется известным соотношением

$$\kappa = \tau_n / (\tau_n + \tau_{np}), \quad (12.25а)$$

где τ_n — среднее время жизни носителей в активной базовой области; τ_{np} — время пролета носителей через последнюю. Учитывая, что $\tau_n \gg \tau_{np}$, выражение (12.25а) преобразуется:

$$\kappa \approx 1 - \tau_{np} / \tau_n. \quad (12.25б)$$

Величина τ_{np} находится из (12.8).

Пример. Рассчитать значение коэффициента передачи $h_{21Э}$ при $U_{БК} = -1$ В, $\Delta h_o = 0$, $h_{o.c} = h_o$, $N_{до} = N_a(h_o) = N_d(h_o)$ для квадратного эмиттера с $10 \leq A_{э.д} \leq 10^3$ мкм² и для эмиттера с $A_{э.д} = 144$ мкм² при размерах длинной стороны $12 \leq a \leq 70$ мкм. Используем данные примеров § 11.5 и § 12.1.

Значение $h_{21Б}$ находится из выражения (12.18). Из (12.25) при $\tau_{np} = 65$ пс и $\tau_n = 50$ нс получим $\kappa = 0,99870$. С помощью соотношений (11.7), (12.20) — (12.24) получим $K_{Г} = 2,16 \cdot 10^{12}$ см⁻¹, $j_{ЭБрп} = 2,82 \cdot 10^{-1}$ А/см², $j_{ЭБор} = 8,13 \cdot 10^{-13}$ А/см² и $\gamma = 0,99944$. При квадратном эмиттере с $A_{э.д} = 144$ мкм² из (12.19б) имеем $\gamma^* = 0,99351$. Тогда, значения $h_{21Б} = 0,99166$ и $h_{21Э} = 120$. Для других значений $h_{21Э}$ и формы эмиттера, отличной от квадрата, аналогично получим значения $h_{21Э}$, показанные на рис. 12.10.

Следует отметить, что значения $h'_{21Б} = \gamma\kappa = 0,99814$ и $h'_{21Э} = 1/(1-h'_{21Б}) = 510$ не зависят от геометрических размеров эмиттера транзистора, а определяются электрофизическими характеристиками структуры.

Коэффициент передачи при инверсном включении. Воспользуемся рис. 11.7 соотношениями (11.35), (11.36), (11.41) и (11.42), считая, что при инверсном включении эмиттерный и коллекторный переходы меняются местами. Как показывает анализ, между плотностями электронного тока на соответствующих участках (рис. 1.7) существует соотношение:

$$j_{n1} > j_{n2} \gg j_{n3}. \quad (12.26)$$

Поэтому при расчете инверсного коэффициента передачи тока $h_{21БИ}$ плотность тока j_{n3} не учитывается.

Величина $h_{21БИ}$ обычно не превышает 0,8...0,9 и при узкой азе (ω_1) можно считать $\kappa \approx 1$. Тогда, считая $p_n(0) = n_p(0)$,

$$h_{21БИ}^{-1} \approx 1 + [(K_1 - 1) j_{n2} + K_1 j_{p1} + K_2 j_{p3}] / j_{n1}, \quad (12.27)$$

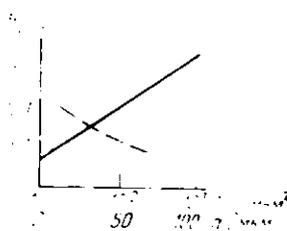


Рис. 12.10. Зависимости значения коэффициента h_{21} $n-p-n$ транзистора от геометрических характеристик эмиттерного перехода

Таблица 12.2. Параметры $n-p-n$ транзистора

| | | | |
|------------------|------|------|------|
| ω_2 , мкм | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| K_2 | 3,1 | 4,2 | 5,3 |
| h'_{06} , мкм | 0,24 | 0,32 | 0,40 |

а с учетом соотношений (12.26)

$$h_{21БН}^{-1} = 1 + [\exp(\omega_1/h'_{06}) - 1] \{ (K_1 - 1) [\exp(\omega_2/h'_{06}) - 1] + [(D_p h'_{06}) \cdot (L_p D_n)] [K_2 + K_1 \text{th}(\Delta h_{ЭП} L_p)] \}, \quad (12.28)$$

где K_1 и K_2 — отношения донной и боковой площадей эмиттерного перехода к площади донной части коллекторного перехода. Из анализа выражений (12.27) и (12.28) следует, что $h_{21БН}$ возрастает при увеличении глубины залегания эмиттерного перехода и концентрации примесей в эмиттерной области, а также при уменьшении толщины базы транзистора, поверхностной концентрации примесей базовой диффузии, толщины эпитаксиальной пленки n -типа и величин K_1 и K_2 .

Пример. Рассчитать значения инверсного коэффициента передачи в схеме с общим коллектором ($h_{21К}$) транзистора с электрофизическими характеристиками областей, его образующих, данными в § 10.3 при $K_1=10$ и следующих двух наборах значений параметров: 1) $0,4 \leq \omega_1 \leq 1,0$ мкм; $\omega_2=1,5; 2,0; 2,5$ мкм

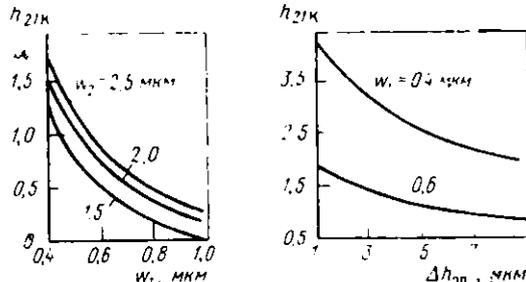


Рис. 12.11. Зависимости $h_{21К}$ $n-p-n$ транзистора от параметров

$\Delta h_{21п}/L_p \rightarrow \infty$; 2) $\omega_1=0,4; 0,6$ мкм; $\omega_2=2,0$ мкм; $\Delta h_{21п}=1-9$ мкм. Используем данные примеров § 11.5 и § 12.1.

Расчетные значения K_2 и h'_{06} по формуле (10.10) представлены в табл. 12.2. Из исходных данных, выражения (12.11) и соотношения (12.28) получены значения $h_{21к}$, представленные на рис. 12.11. При $\omega_1=0,6$ мкм и $\omega_2=2,0$ мкм из (12.26а) соотношение $j_{n1}/j_{n2}=90$, что подтверждает неравенство (12.26).

Соотношения, определяющие частотные зависимости коэффициента передачи, имеют вид:

$$h_{21БН}^{-1}(\omega) = h_{21БН0}^{-1} + i\omega [\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1] [(K_1 - 1)h'_{06} + K_1 \Delta h_{21п}] h'_{06} D_n \quad (12.29а)$$

$$|\Delta h_{21п}/L_p(\omega)| \leq 0,75; \quad h_{21БН}^{-1}(\omega) = h_{21БН0}^{-1} + b\omega^{1/2} + i(g\omega + b\omega^{1/2}) \quad (12.29б)$$

при $|\Delta h_{21п}/L_p(\omega)| \geq 1$ и $\omega\tau_p \geq 2,0 \dots 2,5$, где $b=0,7K_1 D_p^{1/2} \times [\exp(\omega_1/h'_{06}) - 1] h'_{06}/D_n$, а $g = (K_1 - 1) \{[\exp(\omega_1/h'_{06}) - 1]\}$; при $|\Delta h_{21п}/L_p(\omega)| \geq 1$, а $\omega\tau_p < 2,0 \dots 2,5$ (12.29в)

следует использовать формулу (12.29а), заменив в ней $\Delta h_{21п}$ на $0,5L_{p0}$.

В соотношениях (12.29) $L_p(\omega) = L_{p0} \sqrt{1 + i\omega\tau_p}$, а L_{p0} — диффузионная длина при $\omega = 0$ и $i = 1$. Как следует из выражений (12.29) при справедливости (12.29а), частотная зависимость коэффициента передачи имеет обычный вид [см. (12.5)] и переходная характеристика $h_{21БН}(t)$ определяется постоянной времени

$$\tau_{h_{21БН}} = h_{21БН0} [\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1] [(K_1 - 1)h'_{06} + K_1 \Delta h_{21п}] h'_{06} D_n. \quad (12.30)$$

При использовании выражения (12.29б) частотная и переходная характеристики $h_{21БН}$ имеют более сложный вид. Из соотношений (12.29) видно, что динамические характеристики коэффициента передачи улучшаются при уменьшении значений $\Delta h_{21п}$, ω_2 и K_1 и при увеличении концентрации примесей в эмиттерной области. Однако эти характеристики существенно уступают аналогичным характеристикам при нормальном включении транзистора. Поэтому влияние постоянных времени, связанных с зарядом емкостей транзистора и пролетом носителей, можно не учитывать. Кроме того, в соотношении (12.5) можно считать $m = 0$.

Пример. Рассчитать значения постоянной времени $\tau_{h_{21БН}}$ и граничной частоты $f_{h_{21БН}}$ транзистора при инверсном включении с электрофизическими характеристиками областей, его образующих, данными в § 10.3 при $K_1=10$;

$\Delta h_{\text{эп}} = 3$ мкм, $\omega_1 = 0,6$ мкм; $\omega_2 = 2$ мкм. Используем данные примеров § 11.5, § 12.1.

Из (12.29а) значение $\tau_{h_{21Б}}$ ≈ 18 нс. Проверка подтверждает выполнение неравенства $|\Delta h_{\text{эп}}/L_p(\omega)| \leq 0,75$. Из (12.9) получим $f_{h_{21Б}} \approx 9$ МГц. Сравнение данных этого примера и примера § 12.1 ($f_{h_{21Б}} \approx 780$ МГц) подтверждает существенное ухудшение динамических характеристик при изменении режима работы транзистора.

12.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ *p-n-p* ТРАНЗИСТОРОВ

В настоящее время в интегральных микросхемах получили распространение два типа *p-n-p* транзисторов: вертикальный, использующий в качестве коллектора донную часть изолирующего перехода, и горизонтальный (продольный). Их главное достоинство по сравнению с транзисторами с более сложной структурой заключается в том, что они не усложняют технологии изготовления микросхем и формируются одновременно с *n-p-n* транзисторами.

Вертикальный *p-n-p* транзистор. На рис. 12.12 показана структура вертикального *p-n-p* транзистора, имеющего ту же структуру, что и паразитный транзистор (§ 12.1). Расчет коэффициента передачи тока в таком транзисторе весьма прост, так как его базовая область легирована однородно. Коэффициент $h_{21Б}$ у этого транзистора на один-два порядка меньше, чем у *n-p-n* транзистора, поэтому, полагая $\gamma \approx 1$,

$$h_{21Б} \approx \gamma^* \kappa = \gamma^* \operatorname{sch}(\omega/L_p) \quad (12.31a)$$

и при $\omega/L_p \ll 1$

$$h_{21Б} \approx \gamma^* [1 - 0,5(\omega/L_p)^2], \quad (12.31б)$$

где γ^* — эффективный коэффициент инжекции, определяющий долю дырочного тока, инжектируемого эмиттером в вертикальном направлении в полном токе эмиттера. Для расчета величины γ^* полагали, что боковые стенки эмиттерного перехода — прямоугольные с длиной L и шириной z ($L = L' + 1,4h_3$, и $z = z' + 1,4h_3$, где L' и z' — длина и ширина окна под базовую диффузию

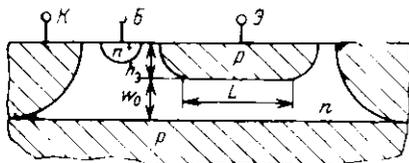


Рис. 12.12. Структура «паразитного» *p-n-p* транзистора

(см. рис. 12.12), а расстояние от боковой границы эмиттерного перехода до границы изолирующего перехода не менее L_p . Тогда

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + (A_{b,б} - A_{b,д}) \operatorname{th}(\Lambda h_{em} L_p). \quad (12.31в)$$

Определение геометрических размеров транзистора производится соотношениями, аналогичными (12.14):

$$\frac{I_{энт}}{z} = \begin{cases} \varphi_r L (\rho_б \omega \gamma^*) & \text{при } \psi \geq 1; \\ \varphi_r / (\gamma^* \rho_б) \sqrt{2(1-\kappa)^{-1}} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.31г)$$

а

$$\psi = (\omega/L) \sqrt{2(1-\kappa)^{-1}}.$$

В соотношения (12.31г) входит $\gamma^* = f(z)$, поэтому расчет надо производить 2–3 раза, начиная с минимального z .

Расчет сопротивления базовой области, тела коллектора и быстродействия транзисторов проводится аналогично найденным этим параметрам у n - p - n транзистора (12.8).

Транзисторы этого типа при $\omega_0 = 1 \dots 10$ мкм имеют $h_{21Э} = 1 \dots \dots 30$, $f_{h_{21Б}} = 1 \dots 40$ МГц, $TK_{h_{21Э}} = 0,3 \dots 0,5$ %/К.

Пример. Рассчитать коэффициент передачи вертикального p - n - p транзистора, частоту $f_{h_{21Б}}$ и геометрические размеры эмиттерной области при $\omega_0 = 5$ мкм; $\rho_б = 0,5$ Ом·см; $D_p = 10,4$ см²/с и $L_p = 10,2$ мкм (см. пример § 11.5); $I_{Э} = 1$ мА при длине окна под эмиттерную область $L = 12$ мкм и $h_{Э} = 3$ мкм.

Взяв минимальное значение $z = 12$ мкм и $\omega = \omega_0$ из (12.31) и (12.32), получим $\kappa = 0,89$; $\gamma^* = 0,75$ и $\psi = 1,3 > 1$. Тогда $I_{э,пт}/z = 0,0225$ мА/мкм, а $z = 44$ мкм. Уточненное значение $\gamma^* = 0,81$. Повторив процедуру, получим $z = 48$ мкм, что близко к предыдущему результату. Значения $z' \approx 44$ мкм, $h_{21Б} = 0,72$ и $h_{21Э} = 2,6$. Будем полагать, что $\tau_{h_{21Б}} \approx t_{д} = \omega^2/2D_p = 12$ нс, а соответствующая частота $f_{h_{21Б}} \approx 13$ МГц.

Горизонтальный p - n - p транзистор. Горизонтальный транзистор, показанный на рис. 12.13, отличается от вертикального тем, что до коллектора доходят носители, инжектируемые только боковой поверхностью эмиттерного перехода в горизонтальном направлении (j_r), а носители, инжектируемые основанием в вертикальном направлении (j_n), рекомбинируют в объеме полупроводника. Для удобства расчета электрических параметров обычно заменяют боковые участки эмиттерного перехода прямыми линиями и полагают

$$\begin{aligned} L_1 &= L'_1 + 2h_n \cos(\pi/4) \approx L'_1 + 1,4 h_n, \\ L_2 &= L'_2 + 1,4 h_n, \quad \omega = \omega' - 1,4 h_n. \end{aligned} \quad (12.32)$$

Значения L'_1 , L'_2 и ω' берутся по фотошаблону, а h_n — глубина залегания эмиттерного и коллекторного переходов.

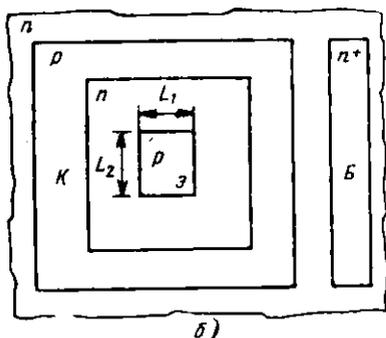
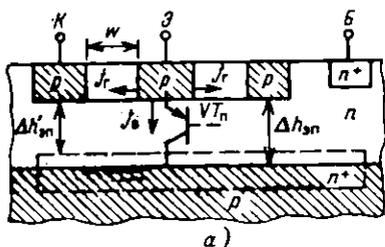


Рис. 12.13. Структура (а) и топология (б) горизонтального $p-n-p$ транзистора

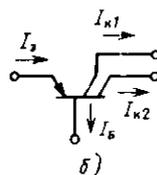
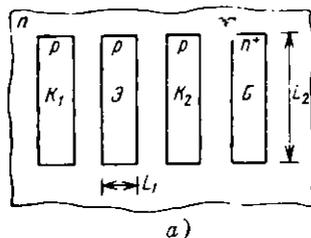


Рис. 12.14. Топология (а) и электрическая схема (б) двухколлекторного горизонтального $p-n-p$ транзистора

Выражение для определения коэффициента передачи тока совпадают с (12.31а), только γ^* определяет долю дырочного тока, инжектируемого эмиттером в горизонтальном направлении, в полном токе эмиттера (рис. 12.13). В общем случае (рис. 13.14, при объединенных коллекторах) величина

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + A_{э,б2} j_{r2} / (A_{э,б1} j_{r1}) + A_{э,д} j_{n'} / (A_{э,б1} j_{r1}), \quad (12.33)$$

где $A_{э,б1}$ — площадь боковой поверхности эмиттера, ближайшей к коллектору; $A_{э,б2}$ — площадь остальной боковой поверхности эмиттера; j_{r1} и j_{r2} — плотности соответствующих горизонтальных токов. Для структуры рис. 12.13 значение $A_{э,б2} = 0$. Протекание тока $j_n A_{э,д}$ приводит к появлению паразитного $p-n-p$ транзистора, показанного на рис. 12.13,а штриховой линией ($V T_n$). Величины γ^* и α зависят от формы эмиттерной и базовой областей, а также от структуры полупроводниковой пластины. Будем полагать, что эмиттерные области и внутренние части коллекторных областей имеют прямоугольную форму (см. рис. 12.13,б), а пластина имеет $n-p$ -структуру со скрытым n^+ -слоем или без него, и что тран-

зистор работает в активном режиме. Соотношение (12.33) примет вид:

при наличии скрытого n' -слоя

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + (1/A_{э.б1}) \operatorname{th}(\omega/L_p) [A_{э.б2} + A_{э.д} \operatorname{th}(\Delta h'_{эп}/L_p)]; \quad (12.34a)$$

при его отсутствии

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + (1/A_{э.б1}) \operatorname{th}(\omega/L_p) [A_{э.б2} + A_{э.д} \operatorname{cth}(\Delta h_{эп}/L_p)]. \quad (12.34б)$$

Соотношения (12.34) получены при использовании уравнений (11.16)–(11.18) и (11.21). Значение κ определяется из формул (12.31). Из анализа соотношений (12.32), (12.34) следует, что величина $h_{21б}$ увеличивается при наличии скрытого n' -слоя и уменьшении $\Delta h'_{эп}$, а также при уменьшении ширины эмиттерного перехода и увеличении глубины его залегания.

При определении геометрических размеров транзисторов с использованием соотношений (12.14) следует учесть только горизонтальную составляющую эмиттерного тока, тогда выражение примет вид

$$\frac{I_{эпп}}{z} \begin{cases} \Phi_r h_n (\rho_б \omega \gamma^*) & \text{при } \psi \geq 1; \\ \Phi_r (\gamma^* \rho_б) [2(1 - h_{21б} \gamma^*)]^{1/2} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.35a)$$

где $z = (2L_1 + L_2)$, а

$$\psi = (\omega h_n) \sqrt{2(1 - h_{21б} \gamma^*)}. \quad (12.35б)$$

Кроме горизонтальных транзисторов с коллектором, полностью охватывающим эмиттер (см. рис. 12.13), часто используется транзистор с разомкнутым коллектором, показанный на рис. 12.14,а. В этой конфигурации коллекторы могут быть либо объединены, либо разделены. В последнем случае транзистор имеет два коллектора (рис. 12.14,б). Обычно горизонтальные транзисторы имеют $h_{21э} \leq 50 \dots 100$.

Температурный коэффициент $h_{21э}$ горизонтального транзистора имеет приблизительно такую же величину, что и у вертикального $p-n-p$ транзистора ($TK h_{21э} = 0,3 \dots 0,5 \%$ /К).

Пример. Рассчитать значение коэффициента передачи горизонтального транзистора со структурой рис. 12.14,а при объединенных коллекторах и ширину эмиттера L'_2 (по фотошаблону) при $I_K = 1$ мА. Примем длину эмиттера (по фотошаблону) $L'_1 = 12$ мкм, расстояние между эмиттером и коллектором (по фотошаблону) $\omega' = 6$ мкм, $h_n = 2,4$ мкм, $\rho_б = 0,5$ Ом·см, $\Delta h'_{эп} = 2,6$ мкм, $L_p = 10,2$ мкм (см. пример § 12.4). Имеется скрытый n' -слой.

Значения $\omega = \omega' - 1,4 h_n = 2,64$ мкм; $L_1 = L'_1 + 1,4 h_n = 15,36$ мкм. Из (12.34а), считая, что $A_{э.б2} = 0$ и $A_{э.д}/A_{э.б} = 3,2$, получим $\gamma^* \approx 0,83$ и из (12.31б) — $\kappa \approx 0,967$. Тогда, используя (12.35), получим $\psi = 8,6 > 1$ и $I_{эпп}/z = 0,0057$ мА/мкм. Учитывая, что $z = 2L_2$, имеем $L_2 \approx 88$ мкм, а $L'_2 \approx 85$ мкм.

Учитывая, что $z=2L_2$, имеем $L_2 \approx 88$ мкм, а $L'_2 \approx 85$ мкм. При найденном значении L_2 получим уточненное $\gamma^* = 0,79$, $h_{21Б} = 0,764$ и $h_{21Э} = 3,2$.

Частотные характеристики горизонтальных транзисторов. Частотные зависимости коэффициента передачи горизонтального транзистора определяются как и для обычного $n-p-n$ транзистора (12.6). Однако для горизонтального транзистора необходимо учесть, что заряд неосновных носителей накапливается не только в «активной» базовой области, но и под дошной частью эмиттерного перехода. Для горизонтального транзистора

$$\tau_{h_{21Б}} \approx Q_n / I_K, \quad (12.36)$$

где $Q_n = Q_d + Q_0$, а Q_d и Q_0 — заряды неосновных носителей, носителей, накопленные под дошной частью эмиттера и в активной базе. Выражение (12.36) с учетом (11.19), (12.31), (12.34) запишется в виде:

при отсутствии скрытого n^+ -слоя

$$\tau_{h_{21Б}} \approx \tau_p [\operatorname{ch}(\omega L_p) - 1] \{1 + \{A_{э,д} \operatorname{sh}(\omega L_p) / A_{э,б1} [1 - \operatorname{ch}(\omega L_p)]\} \times \\ \times \{A_{э,б2} / A_{э,д} + [\operatorname{ch}(\Delta h_{эп} / L_p) - 1] \operatorname{sh}(\Delta h'_{эп} / L_p)\}\}, \quad (12.37a)$$

при наличии скрытого n^+ -слоя

$$\tau_{h_{21Б}} \approx \tau_p [\operatorname{ch}(\omega L_p) - 1] \{1 + A_{э,д} \operatorname{sh}(\omega L_p) \{A_{э,б1} [\operatorname{ch}(\omega L_p) - \\ - 1]\} [A_{э,б2} / A_{э,д} + \operatorname{th}(\Delta h'_{эп} / L_p)]\}. \quad (12.37б)$$

Если ωL_p , $\Delta h_{эп} / L_p \ll 1$, то уравнения (12.37) преобразуются соответственно:

$$\tau_{h_{21Б}} \approx (\omega^2 / 2D_p) [1 + A_{э,д} L_p (A_{э,б1} \omega) (A_{э,б2} / A_{э,д} + \Delta h_{эп} / L_p)], \quad (12.38)$$

$$\tau_{h_{21Б}} \approx (\omega^2 / 2D_p) [1 + 2A_{э,д} L_p (A_{э,б1} \omega) (A_{э,б2} / A_{э,д} + \Delta h'_{эп} / L_p)]. \quad (12.39)$$

Как видно из уравнений (12.37) — (12.39), заряд, накопленный под основанием эмиттерного перехода, уменьшает быстродействие горизонтального транзистора. Причем при наличии скрытого n^+ -слоя быстродействие несколько меньше, чем в его отсутствие. Обычно горизонтальные транзисторы имеют $f_{h_{21Б}} \leq 50$ МГц.

Пример. Рассчитать значения $\tau_{h_{21Б}}$ и $f_{h_{21Б}}$ горизонтального транзистора при наличии или отсутствии скрытого n^+ -слоя. Примем, что транзистор имеет параметры, данные в примерах § 11.5, 12.4, и $\Delta h_{эп} = \Delta h'_{эп}$.

Из уравнений (12.37) $\tau_{h_{21Б}} = 18$ нс без n^+ -слоя и $\tau_{h_{21Б}} = 29$ нс с n^+ -слоем. Значения граничных частот $f_{h_{21Б}}$, полученные из (12.9), равны соответственно 8,8 и 5,5 МГц.

Многоколлекторный горизонтальный транзистор. Горизонтальный транзистор со структурой, изображенной на рис. 12.14,а, мо-

жет иметь несколько коллекторных областей, при этом упрощается технология микросхемы, в которой необходимо иметь $p-n-p$ транзисторы с объединенными эмиттерными и базовыми контактами, в частности в микросхемах интегральной инжекционной логики. В ряде микросхем горизонтальный $p-n-p$ транзистор должен иметь небольшой, но стабильный коэффициент передачи при различных технологических режимах его изготовления.

Рассмотрим структуру на рис. 12.14. Обозначим суммарный коэффициент передачи транзистора $h_{21Эс}$, при условии, что оба коллектора (K_1 и K_2) объединены. Коэффициент передачи транзисторов при использовании каждого коллектора в отдельности $h_{21Э1}$, $h_{21Э2}$. Полагая $h_{21Э1,2} \gg 1$ и используя (12.34), имеем при $\alpha = 1$

$$h_{21Э1} = h_{2Эс} A_{61} / A_{6,c}, \quad (12.40a)$$

$$h_{21Э2} = h_{21Эс} A_{62} / A_{6,c}, \quad (12.40b)$$

где A_{61} , A_{62} — площади соответствующих боковых поверхностей эмиттерного перехода; $A_{6,c} = A_{61} + A_{62}$. Соединим коллектор K_2 с базой. В этом случае с учетом (12.40)

$$I_{K1} = I_B' h_{21Эс} A_{61} / A_{6,c}; \quad I_B' = I_B - I_{K2}.$$

Реальный коэффициент передачи

$$h_{21Эр} = I_{K1} / I_B = A_{61} (A_{6,c} h_{21Эс} + A_{62})^{-1} \quad (12.41a)$$

обладает высокой стабильностью. Полагая, что $A_{61} = n A_{62}$ (n — постоянная), из (12.41a) имеем

$$h_{21Эр} = n [1 + (1 + n) h_{21Эс}]^{-1}. \quad (12.41b)$$

Полагалось, что $j_{r1} = j_{r2}$ [см. (12.33)].

Пример. Рассчитать изменение $h_{21Эр}$ при изменении $h_{21Эс}$ в диапазоне 5 ... 20, если при $h_{21Эс} = 10$ значение $h_{21Эр} = 2$. Из (12.41b)

$$n = (h_{21Эр} h_{21Эс} + h_{21Эр}) / (h_{21Эс} - h_{21Эр}) = 2,75;$$

при $n = 2,75$ и $h_{21Эс} = 5 \dots 20$ из (12.41b) получим $h_{21Эр} = 1,6 \dots 2,3$. Это означает, что при изменении значения $h_{21Эс}$ в два раза (относительно $h_{21Эс} = 10$), значение $h_{21Эр}$ меняется лишь на 20% (относительно $h_{21Эр} = 2$).

12.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ $p-n$ ПЕРЕХОДОВ

Диоды в микросхемах изготавливаются одновременно с другими элементами: биполярными транзисторами и пассивными элементами. Как говорилось выше, параметры диффузионных процессов и полупроводниковой пластины определяются требованиями-

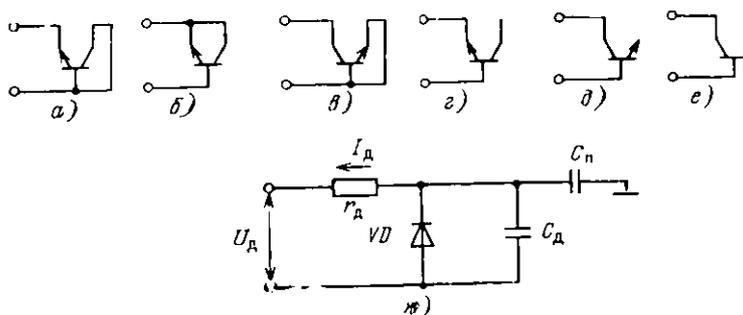


Рис. 12.15. Электрические (а—е) и эквивалентная (ж) схемы интегральных диодов

ми, обеспечивающими заданные параметры биполярных транзисторов. Поэтому диоды формируются на основе уже определенных технологических режимов изготовления микросхем, и возможности оптимизации их параметров ограничены.

Диоды имеют температурное изменение прямого напряжения $dU_d/dT \approx (1,9 \dots 2,1) \text{ мВ/К}$.

Структура диодов в микросхеме. Любой из $p-n$ переходов имеющихся в микросхеме, может использоваться как диод. Как правило, для изготовления диодов используются транзисторные структуры (рис. 12.15) при различном объединении электродов. Исключение составляет структура на рис. 12.15,е, в которой отсутствует эмиттерный переход. Использование этих конфигураций позволяет изменять параметры диодов. На рисунке r_d , C_d и C_n — последовательное активное сопротивление без учета сопротивления самих $p-n$ переходов, емкость и паразитная емкость диода по отношению к потенциалу напряжения, фиксирующего потенциал p -области изолирующего $p-n$ перехода (часто p -подложка подключена на «землю», что и показано на рис. 12.15,ж); U_d и I_d — падение напряжения на диоде и ток через него. В схемах рис. 12.15 не учтено влияние паразитного $p-n-p$ транзистора, величина h_{21E} которого полагается близкой к нулю вследствие использования скрытого n^+ -слоя.

В табл. 12.3 представлены ВАХ интегральных диодов. Тип диода (а—е) соответствует рис. 12.15. Величины тепловых токов находятся из соотношений (11.16)—(11.18), (11.21). В табл. 12.4 представлены основные параметры диодов в микросхемах: t_n — время восстановления обратного сопротивления диода, определяемое накопленными зарядами неосновных носителей и областями, в которых это накопление происходит, представленное в относительных единицах. Значения r_d получены из табл. 12.3.

Таблица 12.3. Вольт-амперные характеристики ВАХ интегральных диодов

| Тип диода | I_d | U_d |
|-----------|--|-------------------------------------|
| a | $I_{ЭБ0} \exp(U_{ЭБ}/m_1^{**} \varphi_T)$ | $U_{ЭБ} + I_d r_6/h_{21Э}$ |
| б* | $I_{КБ0} (1 - h_{21Б} h_{21БН}) \exp(U_{КБ}/m_2^{**} \varphi_T)$ | $U_{КБ} + I_K r_{нк} + I_d r_6$ |
| в | $I_{КБ0} \exp(U_{КБ}/m_2 \varphi_T)$ | $U_{КБ} + r_6 h_{21К} + r_{нк} I_d$ |
| г | $I_{ЭБ0} (1 - h_{21Б} h_{21БН}) \exp(U_{ЭБ}/m_1 \varphi_T)$ | $U_{ЭБ} + r_6 I_d$ |
| д | $I_{КБ0} (1 - h_{21Б} h_{21БН}) \exp(U_{КБ}/m_2 \varphi_T)$ | $U_{КБ} + (r_{нк} + r_6) I_d$ |
| е | $I_{КБ0} \exp(U_{КБ}/m_2 \varphi_T)$ | $U_{КБ} + I_d r_{нк}$ |

* $I_K = I_{КБ0} \exp(U_{КБ}/m_2 \varphi_T) - I_{ЭБ0} \exp(U_{ЭБ}/m_1 \varphi_T)$; $U_{ЭБ} = U_{КБ} + I_K r_{нк}$.

** m_1 и m_2 — постоянные ($1 \leq m_{1,2} \leq 2$), учитывающие отличие идеальных ВАХ $p-n$ переходов от реальных.

Таблица 12.4. Основные электрические параметры интегральных диодов микросхем

| Тип диода | r_d | C_d | $C_{п}$ | $U_{проб}$ | $t_{п}$ |
|-----------|------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|---------|
| a | $r_6/h_{21Э}$ | C_d | $C_{п1}$ | $U_{ЭБ прроб}$ | 1 |
| б | r_6 | $C_d + C_{нк}$ | $C_{п1}$ | $U_{ЭБ прроб}$ | 30 |
| в | $r_6 h_{21К} + r_{нк}$ | $C_{нк}$ | $C_{п2}$ | $U_{КБ прроб}$ | 18 |
| г | r_6 | C_d | $C_{п1}, C_{п2}/(C_{п1} + C_{п2})$ | $U_{ЭБ прроб}$ | 14 |
| д | $r_{нк} + r_6$ | $C_{нк}$ | $C_{п1}$ | $U_{КБ прроб}$ | 26 |
| е | $r_{нк}$ | $C_{нк}$ | $C_{п1}$ | $U_{КБ прроб}$ | 16 |

Пример. Рассчитать прямые ВАХ диодов, со структурами, изображенными на рис. 12.15,а-е, при наличии n^+ -слоя. Примем: $m_1 \varphi_T = m_2 \varphi_T = 30$ мВ; $\omega = 0,6$ мкм; $\Delta h_{он} = 2,6$ мкм; $A_{э.д} = 144$ мкм² и $A_{к.д} = 720$ мкм², а их отношение $k_2 = 2,9$; $j_{ЭБ0} \approx j_{КБ0п1} \approx 3,4 \cdot 10^{-10}$ А/см² и $j_{КБ0п1} = j_{КБ0п2} = 0,1 \cdot 10^{-10}$ А/см² (см. рис. 12.10 и пример § 11.6); $r_6 = 1$ кОм, $r_{нк} = 100$ Ом. Будем считать, что диодные структуры имеют электрофизические характеристики областей, данные в § 10.3.

Воспользуемся данными примера § 11.6, рис. 11.7 и формулами (11.33а) (11.35), (11.3б), (12.42). Тогда значения $j_{КБ0п2} = j_{КБ0п3} = 0,015 \cdot 10^{-10}$ А/см²; $j_{КБ0п3} = 0,1 \cdot 10^{-10}$ А/см²; $h_{21БН} \approx 0,7$. Считая $h_{21Б} \approx 1$ и используя табл. 12.3, получаем прямые ВАХ диодов, показанные на рис. 12.16. При построении ВАХ диодов со структурой, показанной на рис. 12.15,е при отсутствии эмиттера, предполагалось, что $j_{КБ0п1} = j_{КБ0п2} = j_{КБ0п3} = 0,015 \cdot 10^{-10}$ А/см². Кривые построены без учета возможного наступления высокого уровня инжекции.

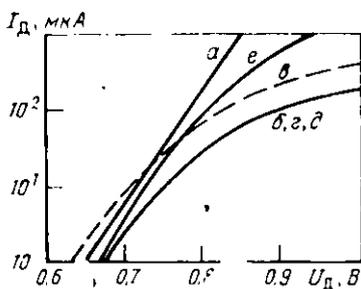


Рис. 12.16. Прямые ВАХ интегральных диодов с различной структурой

Расчет геометрических размеров диодов. При определении геометрических размеров диодов максимальный рабочий ток определяется так же, как и для биполярных транзисторов (см. § 12.2). Превышение максимального тока вызывает уменьшение крутизны ВАХ диода.

В структуре, изображенной на рис. 12.15,а, выбор геометрических размеров проводится с помощью соотношений (12.14), т.е. процессы в этом диоде аналогичны процессам в обычном транзисторе (см. § 12.2). В структуре рис. 12.15,б определяющим является эмиттерный ток, поэтому она рассчитывается аналогично структуре рис. 12.15,а. В структуре рис. 12.15,в основную роль играет ток, определяемый тепловым электронным током коллекторного перехода в активной базовой области [$j_{КБ\text{обл}}$, см. (11.33а)] и, следовательно, геометрические размеры диода определяются наступлением высокого уровня инжекции в активной базовой области. Формулы для расчета тока диода, соответствующие переходу к высокому уровню инжекции ($I_{Д\text{ин}}$), имеют вид:

$$\frac{I_{Д\text{ин}}}{z} = \begin{cases} F \varphi_T L (\rho_6 W h'_{21\text{БН}}) & \text{при } \psi \geq 1, \\ \varphi_T (\rho_6 h'_{21\text{БН}})^{1/2} [2[(1-h'_{21\text{БН}})F]]^{-1} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.42a)$$

где W — толщина базы; $h'_{21\text{БН}} \approx \gamma^{*2} (1 + j_{КБ\text{обл}}/j_{КБ\text{обл}})^{-1}$ и $\psi = (W/L) \{2/[F(1-h'_{21\text{БН}})]\}^{1/2}$, а $j_{КБ\text{обл}}$ определяется из (11.41). В структуре рис. 12.15,г расчет проводится с учетом открытого состояния коллекторного перехода

$$\frac{I_{Д\text{ин}}}{z} = \begin{cases} F \varphi_T L (1-h'_{21\text{БН}})/(\rho_6 W) & \text{при } \psi \geq 1, \\ [\varphi_T (1-h'_{21\text{БН}})^{1/2} \rho_6] [2F(1-h'_{21\text{БН}})]^{1/2} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.42б)$$

где $\psi = (W/L) \sqrt{2/[F(1-h'_{21\text{БН}})F]}$ и $h'_{21\text{БН}} = 1 - h_{21\text{БН}} j_{КБ\text{обл}}/j_{КБ\text{обл}}$.

В структуре рис. 12.15,д расчет проводится с учетом открытого состояния эмиттерного перехода

$$\frac{I_{Д\text{ин}}}{z} = \begin{cases} F \varphi_T L (h_{21К} \rho_6 W) & \text{при } \psi \geq 1, \\ \varphi_T (h_{21К} \rho_6) [2F(1-h'_{21\text{БН}})]^{1/2} & \text{при } \psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.42в)$$

где $\psi = (W/L) \{2/[1-h'_{21\text{БН}}]F\}^{1/2}$ и $h'_{21\text{БН}} = (1 + j_{КБ\text{обл}}/j_{КБ\text{обл}})^{-1}$.

В структурах *a—d* расчет геометрических размеров диода сводится к расчету ширины эмиттерной области z при заданной L . Размеры коллекторного перехода определяются размером эмиттерного перехода. В структуре рис. 12.15, *e* ток диода в основном дырочный, поэтому переход к высокому уровню инжекции определяется параметрами коллекторной области. Используя выражение (11.39) при наличии скрытого n^+ -слоя, получим максимальную плотность тока диода, соответствующую переходу к высокому уровню инжекции ($j_{д.нв}$) в виде:

$$j_{КБр.д.нв} = (qD_p N_K L_p) \operatorname{th} (A h_{дн} / L_p), \quad (12.43)$$

где $A h_{дн}$ — расстояние от донной части коллекторного перехода до границы скрытого n^+ -слоя.

Пример. Рассчитать площадь основания коллекторного перехода диодов со структурами рис. 12.15, *b* и *e* при максимальном токе $I_{д} = 2$ мА; $W = 0,6$ мкм; $h_{дн} \approx 0,7$; $\rho_b = 0,5$ Ом·см; $N_K = 10^{16}$ см $^{-3}$; $D_p = 10,4$ см 2 /с; $L_p = 10,2$ мкм; $\Delta h_{дн} = 2,6$ мкм.

Для структуры *b* из соотношений (12.42а) с учетом данных примера § 11.6 при ширине эмиттерной области $L = 12$ мкм получим $\psi < 1$. Тогда $I_{Д.нв} / z = 0,12$ мА/мкм, где z — ширина области эмиттера. При $I_{Д} = 2$ мА значение $z = 17$ мкм. Полагая расстояния от соответствующих краев окна под эмиттер до краев окна под базу равными 20 и 4 мкм ($L = 12$ мкм, $z = 17$ мкм), получим площадь донной части коллектора $A_{к.д} \approx 900$ мкм 2 . Для структуры рис. 12.15, *e* из соотношения (12.43) получим $j_{КБ, р.д.нв} = 4,1$ А/см 2 . Площадь донной части коллекторного перехода $A'_{к.д}$ при $I_{Д} = 2$ мА равна $A'_{к.д} = 48\,800$ мкм 2 , т. е. $A'_{к.д} / A_{к.д} = 54$. Это означает, что структуру *e* нецелесообразно использовать из-за большой занимаемой площади. Считаюсь, что (см. пример, § 11.6) $j_{КБ, од} \approx 0,11 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 и $j_{КБ, об} \approx 0,38 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 (в предположении, что расстояние от края коллекторного перехода до края изолирующего перехода не меньше L_p).

12.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ С БАРЬЕРОМ ШОТКИ

Диод Шотки (ДШ) представляет собой контакт металла с полупроводником. Его отличает от диодов на основе p - n переходов то, что он работает на основных носителях. В транзисторе с барьером Шотки (ТШ) отсутствует накопление и рассасывание избыточных носителей.

Вольт-амперная характеристика ДШ. Простейшая структура ДШ в микросхеме показана на рис. 12.17, *a*. При больших концентрациях примесей в месте перехода металл — полупроводник образуется омический контакт, поэтому в полупроводнике концентрации примесей $N \leq 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Диоды Шотки могут изготавливаться на полупроводнике как n -, так и p -типа. Однако из-за

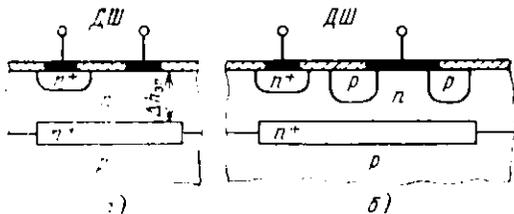


Рис. 12.17. Структура диодов Шотки без охранный кольца (а) и с охранным кольцом (б)

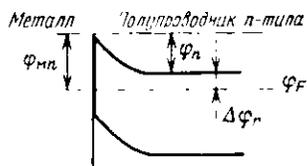


Рис. 12.18. Зонная диаграмма диода Шотки

большей подвижности электронов они обычно формируются на полупроводнике *n*-типа.

На рис. 12.18 представлена зонная диаграмма контакта металл — полупроводник *n*-типа в условиях термодинамического равновесия. На рисунке: φ_{mn} — высота потенциального барьера контакта металл — полупроводник; φ_n — величина, аналогичная контактной разности потенциалов в *p-n* переходе (см. § 11.2);

$$\Delta\varphi_n = \varphi_3/2 - \varphi_r \ln(N_d/n_i). \quad (12.44)$$

Разность потенциалов между дном зоны проводимости полупроводника и уровнем Ферми φ_F . Здесь φ_3 — ширина запрещенной зоны. Для *p*-полупроводника величина $\Delta\varphi_p$, аналогичная $\Delta\varphi_n$, получается из (12.44) заменой N_d на N_a . При приложении напряжения к диоду значение φ_{mn} остается неизменным, а φ_n замещается на $\varphi_n - U$, где U — внешнее напряжение. В табл. 12.5

Таблица 12.5. Высота потенциального барьера контакта металл — кремний для кремния *n*-типа

| Металл | Na | Al | Mo | Ag | W | Ni | Cu | Pd | Au | PtSi | Pt |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| φ_{mn} , В | 0,43 | 0,50 | 0,56 | 0,56 | 0,66 | 0,67 | 0,69 | 0,71 | 0,81 | 0,85 | 0,90 |

представлены значения φ_{mn} для *n*-кремния в зависимости от металла, образующего ДШ. Если с помощью данного металла образуются ДШ на полупроводниках *n*- и *p*-типов, то

$$\varphi_{mn} + \varphi_{mp} = \varphi_3, \quad (12.45)$$

где φ_{mp} — величина, аналогичная φ_{mn} .

Вольт-амперная характеристика ДШ записывается в виде, аналогичном ВАХ $p-n$ перехода

$$j = j_{\text{ош}} [\exp(U_i \varphi_T) - 1], \quad (12.46a)$$

$$j_{\text{ош}} = A^* T^2 \exp(-\Phi_{\text{мн}}/\varphi_T), \quad (12.46б)$$

где T — температура, К; A^* — постоянная Ричардсона. Для n -полупроводника $A^* = 112 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ (для p -полупроводника, $\varphi_{\text{мн}}$ заменяется на $\varphi_{\text{мр}}$ и $A^* = 32 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$). Отличие ВАХ диода Шотки от ВАХ диода на основе $p-n$ перехода определяется только выражением для тока $j_{\text{ош}}$ и меньшими величинами напряжения ДШ в открытом состоянии ($U \leq 0,2 \dots 0,5 \text{ В}$).

Зависимость ширины слоя пространственного заряда ДШ ($\Delta h_{\text{н}}$) от напряжения аналогична соответствующему соотношению для $p-n$ перехода с сильно различающимися концентрациями примесей

$$\Delta h_{\text{н}} = \sqrt{2\varepsilon_{\text{д}} \varepsilon_0 (qN_{\text{д}})} (\varphi_{\text{н}} - U - \varphi_T). \quad (12.47)$$

Величина q , появляющаяся в (12.47) из-за влияния подвижных носителей на напряженность электрического поля. Из соотношения (12.47) следует, что напряжение пробоя ДШ должно совпадать с напряжением пробоя $p-n$ перехода, когда последнее зависит от концентрации примесей лишь в базовой области. Однако в структуре рис. 12.17,а напряжение пробоя существенно меньше, так как определяется пробоем внешней части ДШ, которая действует аналогично закруглению перехода с малым радиусом кривизны (см. § 11.3). Это же явление приводит к увеличению тока $j_{\text{ош}}$ по сравнению с расчетным. Для устранения указанного эффекта делают охранное кольцо (см. рис. 12.17,б), которое препятствует влиянию краевых явлений.

Температурная зависимость напряжения ДШ в открытом состоянии, определенная из (12.46), имеет вид

$$dU/dT = (d\varphi_{\text{мн}}/dT) + [\varphi_T/T] \ln(j/A^* T^2) - 2]. \quad (12.48)$$

Значение $d\varphi_{\text{мн}}/dT \approx -0,2 \text{ мВ/К}$. Анализ (12.48) показывает, что температурная зависимость ДШ в 1,5 ... 2 раза слабее, чем у диодов на основе $p-n$ перехода.

Пример. Рассчитать ВАХ ДШ (кремний n -типа) при комнатной температуре ($T = 300 \text{ К}$) с контактами из Al, Pd и Pt площадью $A_{\text{ш}} = 100 \text{ мкм}^2$ без учета сопротивления тела ДШ и температурную зависимость напряжения ДШ в открытом состоянии при плотности токов, равной 1 и 100 А/см^2 .

Используя уравнение (12.46б), значение $A^* = 112 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$ и данные табл. 12.5, получим следующие значения плотности токов $j_{\text{ош}}$, А/см^2 : $4,45 \cdot 10^{-2}$; $1,38 \cdot 10^{-5}$; $9,3 \cdot 10^{-9}$ для Al, Pd, Pt соответственно. На рис. 12.19 представлены ВАХ диодов Шотки в диапазоне токов 1 мкА ... 10^3 мкА , полученные из уравне-

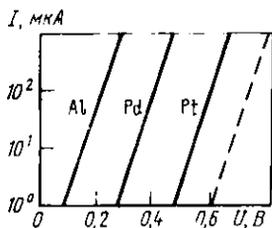


Рис. 12.19. Прямые ВАХ диодов Шоттки с различными материалами контактов

ния (12.46а). Для сравнения на рисунке штриховой линией представлена ВАХ диода на основе коллекторного $p-n$ перехода с $j_0 = 10^{-10}$ А/см² и площадью 100 мкм (см. пример § 12.5).

Из соотношения (12.48) при $d\varphi_{\text{мн}}/dT = -0,2$ МВ/К имеем: $dU/dT = -1,77 + 1,0,087 \ln j$, где j в А/см² и dU/dT в МВ/К. При $j = 1$ А/см² значение $dU/dT = -1,77$ МВ/К и при $j = 100$ А/см² $dU/dT = -1,37$ МВ/К.

Динамические характеристики ДШ. Быстродействие ДШ определяется двумя факторами: зарядом барьерной емкости и временем накопления неосновных носителей. Рассмотрим их влияние.

С помощью соотношения (12.47) получим удельную емкость ДШ:

$$C_{\text{ш}}(U) = \sqrt{q e_{\text{п}} e_0 N_{\text{д}} / 2 (\varphi_{\text{n}} - U - \varphi_{\text{т}})}. \quad (12.49)$$

Заряд этой емкости осуществляется через последовательное сопротивление тела ДШ ($r_{\text{ш}}$). Величина $r_{\text{ш}}$ может быть определена с помощью соотношений (12.3). Предельная рабочая частота ДШ ($f_{\text{ш}}$), определяемая зарядом емкости $C_{\text{ш}}$ ($C_{\text{ш}} = C_{\text{ш}} A_{\text{ш}}$, где $A_{\text{ш}}$ — площадь барьера Шоттки), находится из соотношения, аналогичного (12.9):

$$f_{\text{ш}} = (2\pi r_{\text{ш}} C_{\text{ш}})^{-1} = (2\pi r_{\text{ш}} C_{\text{ш}})^{-1}. \quad (12.50)$$

Формула (12.50) справедлива при

$$r_{\text{бш}} \gg r_{\text{ш}}, \quad (12.51)$$

где

$$r_{\text{бш}} = \varphi_{\text{т}}(j, A_{\text{ш}}) \quad (12.52)$$

— сопротивление барьера Шоттки, определяемое из уравнения (12.45). Условие (12.51) обычно выполняется, если $\varphi_{\text{n}} - U - \varphi_{\text{т}} \gg 0,1$ В. Из (12.49)

$$C_{\text{ш}}(U_1) \approx C_{\text{ш}}(0) \sqrt{1/\Gamma \varphi_{\text{n}}}, \quad (12.53)$$

где $U_1 = \varphi_{\text{n}} - \varphi_{\text{т}} = 0,1$ В.

Для минимизации части $r_{\text{ш}}$, определяемой сопротивлением скрытого n -слоя, целесообразно делать контакт ДШ в виде узкой и длинной плоскости.

Как указывалось выше, работу ДШ определяют только основные носители, т. е. для кремния n -типа — электроны. Влияние дырок мало, когда механизм их переноса в базовой области —

диффузионный, что эквивалентно малым плотностям тока и малым коэффициентам инжекции. Это условие можно записать в виде

$$j \leq (2 \dots 3) j_{п}, \quad (12.54a)$$

где пороговая плотность тока:

$$j_{п} = qN_{д} D_{п} / \Delta h_{эл}. \quad (12.54б)$$

Соответствующая выражениям (12.54) постоянная времени накопления неосновных носителей

$$\tau_{п.ш} \approx qn_i^2 \Delta h_{эл} / (N_{д} j_{п.ш}). \quad (12.55)$$

Если плотность тока $j > (2 \dots 3) j_{п}$, то значение $\tau_{п.ш}$ увеличивается на несколько порядков. Соответствующая формуле (12.55) предельная частота $f_{п.ш}$ получается из выражения (12.50) заменой постоянной времени $\tau_{ш}$ на $\tau_{п.ш}$. Значение предельных частот $f_{ш}$ и $f_{п.ш}$ ограничивают быстродействие ДШ. Из анализа формулы (12.55) следует, что для уменьшения постоянной времени $\tau_{п.ш}$ (увеличения частоты $f_{п.ш}$) следует использовать низкоомные подложки и материал контакта ДШ с малым значением $q_{мн}$.

Пример. Рассчитать для контакта из Pd при концентрациях донорной примеси $N_{д} = 10^{14}$; 10^{16} см⁻³ значения: пороговой плотности тока $j_{п}$; постоянной времени $\tau_{п.ш}$; частоты $f_{п.ш}$. Примем $\Delta h_{эл} = 3$ мкм; $D_{п} = 33$ см²/с при $N_{д} = 10^{14}$ см⁻³; $D_{п} = 26$ см²/с при $N_{д} = 10^{16}$ см⁻³; $j_{0ш} = 1,38 \cdot 10^{-5}$ А/см² (см. пример § 12.6).

Из выражений (12.50), (12.54б), (12.55) получим: при $N_{д} = 10^{14}$ см⁻³; $j_{п} = 1,8$ А/см²; $\tau_{п.ш} = 7,8 \cdot 10^{-11}$ с; $f_{п.ш} = 20$ ГГц и при $N_{д} = 10^{16}$ см⁻³; $j_{п} = 140$ А/см²; $\tau_{п.ш} = 7,8 \cdot 10^{-14}$ с; $f_{п.ш} = 2000$ Гц.

Транзисторы с барьером Шотки. В настоящее время в логических микросхемах для повышения быстродействия транзисторов, работающих в режиме насыщения, в ряде случаев используется ТШ, показанный на рис. 12.20. Для повышения пробивного напряжения и уменьшения плотности тока $j_{0ш}$, так же как и в ДШ, применяется охранный *p*-область, являющаяся частью базовой. Если указанные характеристики не важны, то используется ДШ без охранный области, что уменьшает площадь, занимаемую транзистором. При выборе металла, образующего ДШ, и его площади необходимо обеспечивать, чтобы быстродействие ДШ превышало быстродействие собственно *n-p-n* транзистора, т. е.

$$f_{ш; шш} \geq (4 \dots 5) f_{h_{21Б}}.$$

Из схемы рис. 12.20,а получим аналитическое выражение для тока, протекающего через ДШ, когда транзистор насыщен:

$$I_{д} = I_{Кнас} (S - 1) (h_{21Э} + 1), \quad (12.56)$$

а $S = h_{21Э} I_{г} / I_{Кнас}$ — степень насыщения транзистора (см. § 12.1,

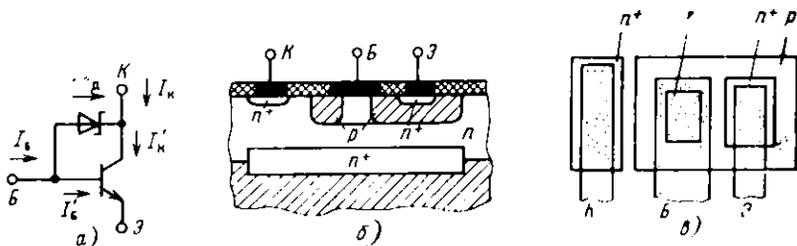


Рис. 12.20. Электрическая схема (а), структура (б) и топология транзистора с барьером Шотки (в)

12.2). Расчет геометрических размеров эмиттера проводится на основании заданного тока $I_{K \text{ нас}}$. При увеличении $S (S \geq 1) I'_{K \text{ нас}} > I_{K \text{ нас}}$, что приводит к уменьшению $h_{21Э}$, это должно учитываться при задании значения S .

Паряду с одноэмиттерными, получили распространение и многоэмиттерные (МЭТ) ТПШ.

Благодаря меньшим напряжениям, падающим на ДШ, работающем в прямом направлении, чем на $p-n$ переходе, ТПШ имеют малый инверсный коэффициент передачи. Используя соотношения (11.33), (12.28), (12.46) получаем:

$$h_{21К} \cdot I_{Э} I_{Б} \approx qn_i^2 D_n K_m (N_D j_{\text{тпш}}), \quad (12.57)$$

где K_m — отношение площади донной части эмиттерного перехода к площади части базового контакта, являющейся ДШ (A_m) и N_D — число Гуммеля активной базовой области.

Пример. Рассчитать площадь части базового контакта ТПШ из Рд, являющегося ДШ (A_m), в $n-p-n$ транзисторе с частотой $f_{h_{21Б}} = 850$ МГц и зависимость значения $h_{21К}$ от K_m . Примем $N_K = 10^{16} \text{ см}^{-3}$; $h_{21Э} = 100$; $D_n = 18,2 \text{ см}^2/\text{с}$; $N_D = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (см. примеры § 12.1 и 12.3). Будем полагать, что степень насыщения $S = 30$ при коллекторном токе $I_K = 1,8$ мА.

Как следует из примера § 12.6, при $N_D = N_K = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ постоянная времени $\tau_{\text{тпш}}$ практически не ухудшает быстродействие ТПШ. Поэтому необходимо ограничить значение $\tau_{\text{тпш}}$. Из выражения (12.56) значения максимального тока, протекающего через ДШ, $I_D = 0,17$ мА. При значении $j = 2j_n = 280 \text{ А}/\text{см}^2$ [см. (12.54) и пример § 12.6] получим площадь $A_m = 61 \text{ мкм}^2$. Из соотношений (12.49), (12.53) при $q_n = 0,50$ В имеем $C_m(U) = 0,06 \text{ пФ}$. При $f_m = 5f_{h_{21Б}}$ из (12.50) значение $\tau_{\text{тпш}} < 0,6 \text{ кОм}$, реализуемое на практике (см. пример § 12.1). Значение инверсного коэффициента передачи при $j_{\text{тпш}} = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ А}/\text{см}^2$, $h_{21К} = 2 \cdot 10^{-3} K_m$. Изменение значения K_m позволяет варьировать $h_{21К}$.

12.7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЭМИТТЕРНЫХ n - p - n ТРАНЗИСТОРОВ

В микросхемах транзисторно-транзисторной логики на входе стоит МЭТ, представляющий совокупность n транзисторных структур, имеющих общий коллекторный p - n переход. На рис. 12.21 показан транзистор такого типа, имеющий $n=5$. Активные базовые области транзисторов, лежащие под эмиттерными переходами, соединены между собой пассивными областями базы. Отдельные эмиттеры, находящиеся на расстоянии l , образуют горизонтальные n - p - n транзисторы. Для уменьшения связи между эмиттерами необходимо минимизировать коэффициент передачи такого транзистора. В реальных МЭТ, в отличие от горизонтальных p - n - p транзисторов (см. § 12.4), коэффициент передачи n - p - n транзистора весьма мал, так как величина $l \approx L_n$ и электрическое поле в базовой области направлено перпендикулярно поверхности пластины. Указанные факторы приводят к тому, что почти все электроны либо рекомбинируют в пассивных областях базы, либо идут в коллектор.

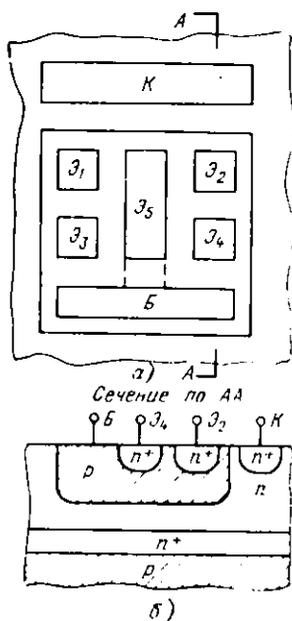


Рис. 12.21. Топология (а) и структура (б) многоэмиттерного транзистора с закорячиваемым эмиттером

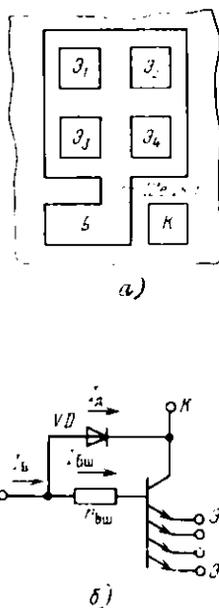


Рис. 12.22. Топология (а) и электрическая схема многоэмиттерного транзистора с «шейкой» (б)

Важное требование, предъявляемое к электрическим характеристикам МЭТ, заключается в минимизации инверсного коэффициента передачи $h_{21К}$, рассчитанного на один эмиттер. Обычно стремятся обеспечить величину $h_{21К}$ порядка сотых долей. Для уменьшения $h_{21К}$ в МЭТ на рис. 12.21 эмиттер \mathcal{E}_5 соединяется с контактом к базовой области (штриховая линия рис. 12.21,а). По аналогии со способом стабилизации коэффициента передачи многоколлекторного горизонтального $p-n-p$ транзистора (см. § 12.4) получим

$$h'_{21К} = h_{21К} (1 + kh_{21К}), \quad (12.58)$$

где $h'_{21К}$ — инверсный коэффициент передачи, рассчитанный на один эмиттер; k — отношение площади донной части \mathcal{E}_5 к площади донной части любого другого эмиттера ($\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_4$). Как видно из (12.58), для уменьшения $h'_{21К}$ необходимо увеличивать k . Кроме того, заметный результат получается только при $h_{21К} \geq 1$, а при $h_{21К} < 1$ такой способ уменьшения $h'_{21К}$ оказывается малоэффективным.

Большими возможностями для минимизации $h_{21К}$ обладает структура МЭТ, показанная на рис. 12.22. Особенностью этого МЭТ является наличие сопротивления в базовой области $r_{б.ш}$ (заштрихованная область «шейки», рис. 12.22,а), которое вызывает нарушение эквипотенциального коллекторного перехода при инверсном включении МЭТ. Как видно из рис. 12.22,б, область контакта к базе (диод VD) имеет большее на $\Delta U_{КБ}$ смещение, чем основная часть коллекторного перехода, в которой расположены эмиттеры. Это вызывает появление части базового тока, мньющего основную часть коллекторного перехода.

Расчет геометрических размеров МЭТ проводится, исходя из соотношений (12.14) так же, как и для обычных $n-p-n$ транзисторов при наличии одного базового контакта (для структуры рис. 12.22 базовый контакт как бы расположен со стороны «шейки»). Сложнее является расчет необходимого сопротивления $r_{б.ш}$, обеспечивающего требуемое значение $h'_{21К}$. Расчет геометрических размеров резисторов дан в § 13.2. Резистор $r_{б.ш}$ при $r_{б.ш} \leq 1$ кОм делается обычно на основе базового слоя, а при $r_{б.ш} > 1$ кОм используется пинч-резистор. По аналогии с расчетом инверсного коэффициента передачи [см. соотношение (12.28) и рис. 11.7]:

$$\begin{aligned} (h'_{21К})^{-1} = & [\exp(\omega_1 h'_{0б}) - 1] \left\{ \frac{D_p h'_{0б}}{D_n L_p} \left(k_1 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{ан}}{L_p} + k_2 \right) + \right. \\ & \left. + \frac{k_1 - n}{\exp(\omega_2 / h'_{0б}) - 1} + \left[\frac{D_p h'_{0б}}{D_n L_p} \left(k_3 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{ан}}{L_p} + k_4 \right) + \right. \right. \end{aligned}$$

$$+ \frac{k_3 + k_4}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \left. \right\} \exp(\Delta U_{\text{КБ}} m \Phi_T), \quad (12.59)$$

где $k_1 - k_4$ — значения отношений площадей донной и боковой частей основного коллекторного перехода и донной и боковой частей контактной области базы к площади донной части эмиттерного перехода соответственно; n — количество эмиттеров; m — постоянный коэффициент, учитывающий отличие ВАХ идеального перехода от реального ($1 \leq m \leq 2$). Из (12.59) следует

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{КБ}} = m \Phi_T \left\{ \ln \left[\frac{1}{h'_{21\text{К}} [\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1]} - \right. \right. \\ \left. \left. - \left[\frac{D_p h'_{06}}{D_n L_p} \left(k_1 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{\text{он}}}{L_p} + k_2 \right) + \frac{k_1 - n}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \right] \right] - \right. \\ \left. - \ln \left[\frac{D_p h'_{06}}{D_n L_p} \left(k_3 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{\text{он}}}{L_p} + k_4 \right) + \frac{k_3 + k_4}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \right] \right\}. \quad (12.60a) \end{aligned}$$

Пренебрегая малыми членами в (12.60a), получаем

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{КБ}} \approx - m \Phi_T \ln \left\{ h'_{21\text{К}} [\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1] \left[\frac{D_p h'_{06}}{D_n L_p} \left(k_3 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{\text{он}}}{L_p} + k_4 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{k_3 + k_4}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \right] \right\}. \quad (12.60б) \end{aligned}$$

Падение напряжения $\Delta U_{\text{КБ}}$ на сопротивлении «шейки» определяется величиной базового тока, втекающего в основную область базы. Ток

$$I_{\text{Бш}} = I_{\text{Б}} h'_{21\text{К}} h_{21\text{К}}, \quad (12.61)$$

где $h_{21\text{К}}$ — инверсный коэффициент передачи тока без учета влияния резистора $r_{6,м}$; $I_{\text{Б}}$ — полный базовый ток МЭТ. Из (12.61)

$$\Delta U_{\text{КБ}} = r_{6,м} I_{\text{Б}} h'_{21\text{К}} / h_{21\text{К}}. \quad (12.62)$$

Выражение $h_{21\text{К}}$ имеет вид [см. рис. 11.7 и (12.28)].

$$\begin{aligned} (h_{21\text{К}})^{-1} = [\exp(\omega_1 h'_{06}) - 1] \left[\frac{D_p h'_{06}}{D_n L_p} \left(k_1 \operatorname{th} \frac{\Delta h_{\text{он}}}{L_n} + k_2 \right) + \right. \\ \left. + \frac{k_1 - n}{\exp(\omega_2 h'_{06}) - 1} \right]. \quad (12.63) \end{aligned}$$

Величина $r_{6,м}$ из выражения (12.62) запишется как

$$r_{6,м} = \Delta U_{\text{КБ}} h_{21\text{К}} (I_{\text{Б}} h'_{21\text{К}}). \quad (12.64)$$

Пример. Рассчитать сопротивление $r_{б.ш}$ для получения $h'_{21к} = 0,05$ в транзисторе со структурой, показанной на рис. 12.22.а. Примем $D_{p^+} = 10,4$ см²/с; $D_{n^+} = 18,2$ см²/с; $L_p = 10,2$ мкм; $h'_{0б} = 0,39$ мкм; $\omega_1 = 0,6$ мкм; $\omega_2 = 2,3$ мкм; $h_k = 2,4$ мкм; $\Delta h_{э.д} = 2,6$ мкм; площади донных частей эмиттерного перехода $A_{э.д} = 141$ мкм², основной части коллекторного перехода $A_{к.д} = 1600$ мкм² и контактной $A_{б.д} = 264$ мкм², боковых поверхностей основной части коллекторного перехода $A_{к.б} = 603$ мкм² и контактной $A_{б.б} = 256$ мкм²; $n = 4$; $m\varphi_T = 0,03$ В; $I_B = 1$ мА.

Коэффициенты k имеют следующие значения: $k_1 = A_{к.д}/A_{э.д} = 11,1$; $k_2 = A_{к.б}/A_{э.д} = 4,2$; $k_3 = A_{б.д}/A_{э.д} = 1,8$; $k_4 = A_{б.б}/A_{э.д} = 1,8$. Инверсный коэффициент передачи без учета влияния «шейки» [см. (12.63)] $h_{21к} = 1,58$. Из выражения (12.60б) получим $\Delta U_{КБ} = 0,136$ В. Из (12.64) $r_{б.ш} = 4,3$ кОм.

Глава 13. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ

13.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДИФFUЗИОННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Для изготовления конденсаторов на основе $p-n$ переходов используются обратносмещенные коллекторный или эмиттерный переходы либо оба перехода, включенные параллельно.

Структура диффузионного конденсатора. На рис. 13.1 показана структура конденсатора на основе $p-n$ перехода и его эквивалентная схема: L_1, L_2 — длины окон под базовую и разделительную диффузию; $C_э, C_к, C_п$ — емкость эмиттерного, коллекторного

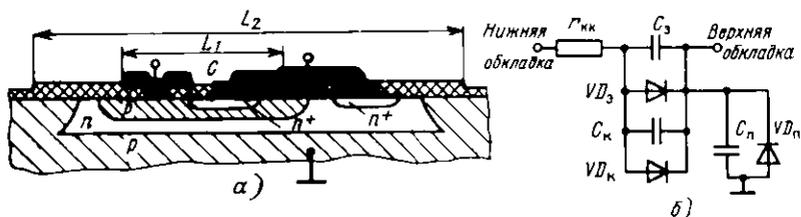


Рис. 13.1. Структура конденсатора на основе $p-n$ переходов (а) и его эквивалентная схема (б)

и паразитного изолирующего переходов: $VD_э$, $VD_к$, $VD_п$ — соответствующие диоды; $r_{кк}$ — результирующее последовательное сопротивление базовой коллекторной области. Для нормальной работы конденсатора необходимо обеспечить закрытое состояние всех p - n переходов.

Из соображений экономии площади емкость конденсатора обычно не превышает 200 пФ. Допуск на емкость определяется диффузионными процессами и составляет около 20%. Роль паразитной емкости оценивается отношением $C/C_п$, которое должно быть как можно больше. Для получения максимального отношения $C/C_п$ необходимо обеспечивать максимальное обратное смещение изолирующего p - n перехода. Обычно $C/C_п \leq 7 \dots 10$. При заданной удельной емкости емкость перехода однозначно определяется его площадью. Для прямоугольного изолирующего перехода со сторонами окна под изолирующую диффузию L_2 и L'_2 при глубине залегания изолирующего перехода, равной толщине эпитаксиальной пленки ($h_{из} = h_{пн}$) для полной площади поверхности перехода

$$A_{из} = A_{из.д} + A_{из.б} = L_2 L'_2 \cdot [\pi h_{из} (L_2 + L'_2) + 8 h_{из}^2], \quad (13.1a)$$

где $A_{из.д}$ и $A_{из.б}$ — площади донной и боковой поверхности изолирующего p - n перехода.

В большинстве случаев в качестве диффузионного конденсатора используется коллекторный переход, имеющий максимальное напряжение пробоя. Площадь прямоугольного конденсатора с длиной и шириной окна под базовую диффузию L_1 и L'_1 и глубиной залегания перехода $h_к$ определяется как

$$A_к = A_{к.д} + A_{к.б} = L_1 L'_1 + [\pi h_к (L_1 + L'_1) + 2 \pi h_к^2], \quad (13.16)$$

где $A_{к.д}$ и $A_{к.б}$ — площади донной и боковой поверхности коллекторного перехода.

На рис. 13.2 показаны зависимости отношения площади донной части коллекторного перехода к его полной площади от длины окна под базовую диффузию ($L = L_1 = L'_1$). Из рисунка видно, что при $L_p \geq 400$ мкм ошибка от замены полной площади перехода площадью основания не превышает 5%.

Пример. Рассчитать геометрические размеры квадратного конденсатора емкостью $C = 55$ пФ (при напряжении на переходе $U = 0$) напряжение пробоя $U_{проб} \geq 30$ В.

Будем использовать коллекторный переход. Из табл. 11.2 и примера § 11.3 получим: $h_к = 2,1$ мкм; $C_0 = 220$ пФ/мм²; $U_{проб} \approx 40$ В. Площадь перехода $A_к = C/C_0 = 0,25$ мм². С погрешностью менее 5% величина $A_к = L^2$. Отсюда $L \approx 500$ мкм.

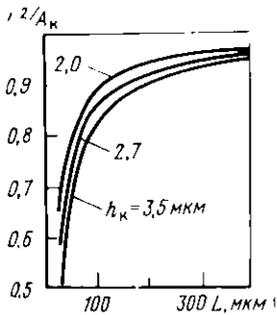


Рис. 13.2. зависимости отношения площади донной части коллекторного $n-p$ перехода к его полной площади от длины окна под базовую диффузию

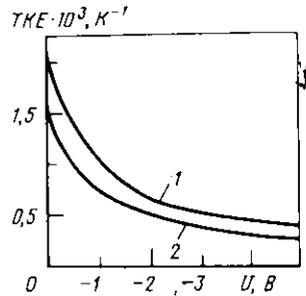


Рис. 13.3. Зависимость ТКЕ от запирающего напряжения на $p-n$ переходе

Температурный коэффициент емкости конденсатора. Исходя из формулы (11.1), выражения для барьерной емкости можно представить в виде:

$$C_0 = f_1(N) \sqrt{\epsilon_n'(\Delta\varphi_0 - U)} \quad (13.2a)$$

для ступенчатого перехода,

$$C_0 = f_2(N) \sqrt[3]{\epsilon_n'^2(\Delta\varphi_0 - U)} \quad (13.2б)$$

для линейного.

Функции $f_1(N)$, $f_2(N)$ зависят от концентрации примеси. Анализ выражений (13.2) показывает, что определяющую роль в температурной зависимости емкости C_0 играют температурные зависимости $\epsilon_n(T)$ и $\Delta\varphi_0(T)$. Согласно (13.2) температурные коэффициенты емкостей

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{2} \left[\text{ТК}(\epsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} \text{ТК}(\Delta\varphi_0) \right] \quad (13.3a)$$

для ступенчатого перехода,

$$\text{ТКЕ} = \frac{1}{3} \left[2 \text{ТК}(\epsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} \text{ТК}(\Delta\varphi_0) \right] \quad (13.3б)$$

для линейного.

В рабочем диапазоне температур ($-60 \dots +125^\circ\text{C}$) $\text{ТК}(\epsilon_n) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ и $\text{ТК}(\Delta\varphi_0) = -(3 \dots 6) \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

На рис. 13.3 представлены зависимости ТКЕ от приложенного напряжения. Кривая 1, соответствующая выражению (13.3б), построена при $\Delta\varphi_0 = 0,8 \text{ В}$ и $\text{ТК}(\Delta\varphi_0) = -3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, а кривая 2 соответствует выражению (13.3a) при $\Delta\varphi_0 = 0,7 \text{ В}$ и $\text{ТК}(\Delta\varphi_0) = -6 \cdot 10^{-3}$

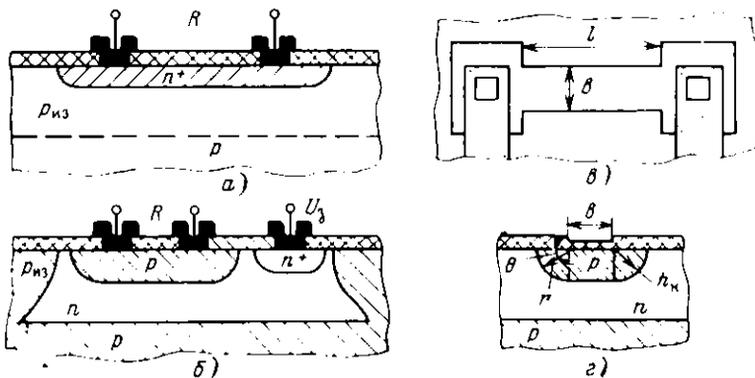


Рис. 13.4. Структура диффузионного резистора на основе эмиттерного n^+ -слоя (а) и базового p -слоя (б); топология резистора на основе p -слоя (в) и структура его канала (г)

К[†]. Реальные зависимости лежат между кривыми 1 и 2. Как видно из рисунка, при увеличении напряжения $|U|$ происходит уменьшение вклада ТК (Δq_0) и если $|U| \gg \Delta q_0$, то определяющую роль играет ТК (ϵ_n).

13.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Резисторы биполярных микросхем обычно изготавливаются на основе отдельных диффузионных областей транзисторной структуры или из поликремния.

Диффузионные резисторы. На рис. 13.4 показаны структуры диффузионных резисторов (ДР) на основе эмиттерной и базовой диффузий. При использовании эмиттерного n^+ -слоя формирование ДР осуществляется в области, полученной при проведении изолирующей диффузии ($\rho_{из}$). Нормальная работа ДР обеспечивается закрытым состоянием переходов, ограничивающих резистивные слои. При использовании эмиттерной диффузии закрытое состояние переходов определяется изолирующим переходом (рис. 13.4.а), а при использовании базовой диффузии необходимо на коллекторную область подать запирающее напряжение U_3 , превышающее напряжение на контактах резистора (рис. 13.4.б).

Наибольшее распространение получили ДР на основе базовой диффузии, поэтому им будет уделено основное внимание. На рис. 13.4.в,г представлены вид сверху и поперечное сечение ДР на основе базовой диффузии. Проводимость канала такого резистора длиной l равна

$$G = G_{c,p} + 2 G_c, \quad (13.4)$$

где $G_{\text{ср}}$ — проводимость средней части (шириной b); G_6 — проводимость боковых частей (ограниченных четвертью окружности с радиусом h_k , рис. 13.4,з). Выражения для $G_{\text{ср}}$ и G_6 (см. (11.5)) имеют вид

$$G_{\text{ср}} = b G_s l, \quad (13.5a)$$

$$G_6 = \frac{q}{l} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^{h_k} \mu_p(N) N(r) r dr, \quad (13.5б)$$

где θ и r — координаты точек боковых частей диффузионной области. Произведя интегрирование в (13.5б) при $h_k = \infty$ (см. § 11.4), получим

$$G_6 = q \pi K h_{06}^2 N_{s6}^{m+1} [4l(m+1)]. \quad (13.6)$$

Сопротивление средней части резистора длиной l без учета влияния боковых частей

$$R_{\text{ср}} = R_s l b. \quad (13.7a)$$

Учет влияния боковых частей ДР на его сопротивление осуществим введением Δb_6 в эффективную ширину $b_{\text{эфф}} = b + 2\Delta b_6$. При этом выражение (13.7a) запишем как

$$R = R_s l b_{\text{эфф}} = R_s l (b + 2\Delta b_6). \quad (13.7б)$$

Используя (11.9) и (13.6), получаем

$$\Delta b_6 = (h_{06}/2) \sqrt{\pi(m+1)}, \quad (13.8a)$$

а подставляя численные значения π и m [см. (11.6б)], имеем

$$\Delta b_6 = 1,02 h_{06}. \quad (13.8б)$$

Расчет геометрических размеров ДР. Диффузионные резисторы имеют либо прямолинейную структуру (см. рис. 13.4,з), либо зигзагообразную структуру (рис. 13.5,а). Сопротивление резистора

$$R = R_s \left(\sum_{i=1}^{n+1} l_i b_{\text{эфф}} + 0,55 n + K_1 + K_2 \right), \quad (13.9)$$

где n — число изломов; 0,55 — эквивалентное число квадратов, определяющее сопротивление области излома — квадрата со стороной b ; K_1 и K_2 — коэффициенты, зависящие от формы и размеров контактных площадок (рис. 13.5). На рис. 13.6 представлена зависимость K от геометрических размеров контакта.

Диффузионный резистор на основе базовой диффузии с сопротивлением 50 ... 500 Ом обычно имеет прямолинейную конфигурацию с контактами, показанными на рис. 13.5,з; ДР с сопротивле-

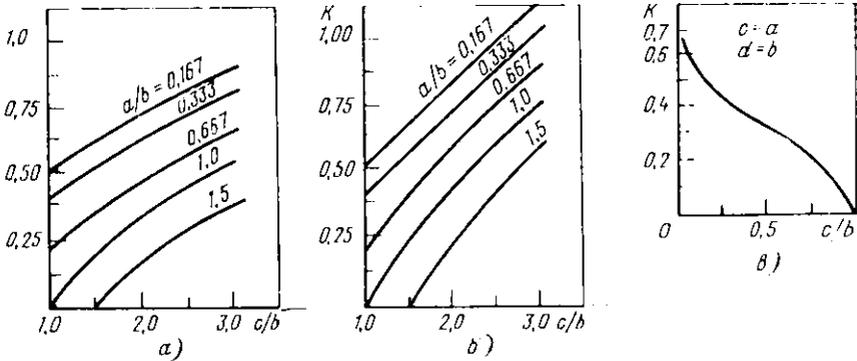
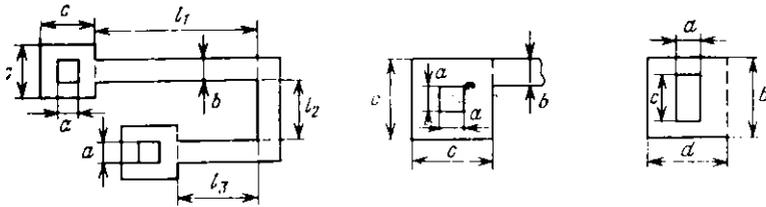
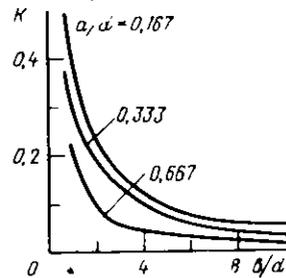


Рис. 13.5. Топологии диффузионного резистора зигзагообразной формы (*а*), несимметричной (*б*) и симметричной (*в*) контактных площадок; соответствующие зависимости коэффициента *K* от размеров этих площадок

Рис. 13.6. Зависимость коэффициента, характеризующего сопротивление контактных площадок, от их геометрических размеров



шнем 500–1000 Ом имеют прямолинейную конфигурацию, а с сопротивлением более 1 кОм — конфигурацию с изломами. В двух последних случаях могут использоваться контактные площадки, показанные на рис. 13.5, *а, б*. При большом сопротивлении ДР применяется зигзагообразная структура с числом изломов $n \gg 1$.

При использовании эмиттерного слоя ДР имеют те же самые конфигурации.

Важным параметром резистора, во многом определяющим его характеристики, является

$$b_{эфф} = \max \{ b_{эфф.0}; b_{эфф.р}; b_{эфф.т} \}, \quad (13.10)$$

где $b_{эфф.0}$ — минимальная эффективная ширина ДР, определяемая технологическими ограничениями; $b_{эфф.р}$ — минимальная эффективная ширина ДР, определяемая допустимой удельной рассеиваемой мощностью (P_0); $b_{эфф.т}$ — минимальная эффективная ширина ДР, обеспечивающая заданную точность изготовления. Величина $b_{эфф.0}$ определяется минимально допустимой шириной резистора (см. табл. П.1). Значение $b_{эфф.р}$ находится из выражения для допустимой мощности (P), рассеиваемой ДР, которая должна удовлетворять неравенству

$$P \leq b_{эфф.р} l P_0, \quad (13.11a)$$

где $P_0 \approx 5$ Вт/мм² — допустимая удельная мощность. Из выражения (13.76) и (13.11a) следует, что

$$b_{эфф.р} = \sqrt{R_s P / (R P_0)}. \quad (13.11b)$$

Значение $b_{эфф.т}$ определяется методом наихудшего случая с учетом технологического разброса значений b , l , R_s :

$$R \pm \Delta R = (R_s \pm \Delta R_s) (l \pm 2 \Delta l) (b_{эфф.т} \mp 2 \Delta b_t). \quad (13.12)$$

Учитывая, что $\Delta l = \Delta b_t$ (разброс линейных размеров одинаков), имеем

$$\Delta R R \approx 2 \Delta b_t b_{эфф.т} + 2 \Delta b_t l + \Delta R_s R_s. \quad (13.13)$$

Соотношение (13.13) определяет относительный разброс сопротивления резистора. Из (13.13) следует, что

$$b_{эфф.т} \approx 2 \Delta b_t (\Delta R R - 2 \Delta b_t l - \Delta R_s R_s). \quad (13.14)$$

При достаточно большом значении $b_{эфф.т}$ и при $l > b_{эфф.т}$ из (13.13) минимальный разброс определяется по формуле

$$(\Delta R R)_{min} = \Delta R_s R_s.$$

Обычно $\Delta R_s / R_s = 5 \dots 10\%$.

Разброс отношения сопротивлений R_1 и R_2 , изготовленный в едином технологическом цикле, не зависит от разброса сопротивлений слоев и при наихудшем сочетании отклонений Δb_t определяется как

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 - \Delta R_2} \approx 1 + 2 \Delta b_t \left(\frac{1}{b_{эфф.1}} + \frac{1}{b_{эфф.2}} + \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right). \quad (13.15)$$

Из (13.15) видно, что при $b_{эфф.1} = b_{эфф.2}$ и $l_1 = l_2$ относительный разброс равен удвоенному разбросу одного резистора.

В соотношениях (13.12)—(13.15) не учтен вклад контактов и изгибов, что не вносит существенной погрешности.

Пример. Рассчитать геометрические размеры ДР (рис. 13.5,а) с $R=1,5$ кОм, с контактными площадками, показанными на рис. 13.5,в. Примем рассеиваемую мощность $P=1,5$ мВт и разброс сопротивления 10 % при $\Delta R_s/R_s=7$ %.

Будем считать, что минимальная ширина окна для изготовления резистора $b_{min}=4$ мкм; систематическая ошибка, связанная с растравливанием окисла $\Delta b_c=0,75$ мкм; ошибка в линейных размерах при изготовлении фотомаски $\Delta b_\phi = \Delta b_\tau = \pm 0,4$ мкм; $R_s=180$ Ом/□ (см. пример § 11.4).

Из (13.86) получим $\Delta b_\phi \approx 1,0$ мкм. Тогда

$$b_{\phi\phi\phi} = b_{min} + 2(\Delta b_c + \Delta b_\phi) \approx 7,5 \text{ мкм.}$$

Считая $l \gg b$, из (13.14) получим $b_{\phi\phi\phi\tau} \approx 27$ мкм. Из выражения (13.116) $b_{\phi\phi\phi R} \approx 6,0$ мкм. Из формулы (13.10) имеем $b_{\phi\phi\phi} \approx 27$ мкм. Ширина окна вскрытия по фотомаске $b = b_{\phi\phi\phi} - 2(\Delta b_c + \Delta b_\phi) = 23,5$ мкм.

Примем $b=24$ мкм. Из формулы (13.9)

$$\sum_{i=1}^{n+1} l_i = b_{\phi\phi\phi} [(R/R_s) - n \cdot 0,55 - K_1 - K_2].$$

Примем $c=16$ мкм, $a=4$ мкм, $d=12$ мкм (рис. 13.5,в). Для нахождения значений K_1 и K_2 из рис. 13.6 вместо величин b , d , a следует использовать $b_{\phi\phi\phi}$, $d_{\phi\phi\phi}$, $a_{\phi\phi\phi}$, которые учитывают влияние Δb_c и Δb_ϕ : $d_{\phi\phi\phi} = d + 2(\Delta b_c + \Delta b_\phi) = 15,5$ мкм; $a_{\phi\phi\phi} = a + 2\Delta b_c = 5,5$ мкм. Значения $b_{\phi\phi\phi}/d_{\phi\phi\phi} = 1,8$, $a_{\phi\phi\phi}/d_{\phi\phi\phi} = 0,35$, а

$K_1 = K_2 = 0,23$. При этом суммарная длина линейных участков $\sum_{i=1}^{n+1} l_i = 183$ мкм.

Температурная зависимость сопротивления ДР. Зависимость сопротивления от температуры определяется температурными характеристиками подвижности и концентрации примесей. В общем виде

$$TKC = (1/R) \partial R / \partial T. \quad (13.16)$$

На рис. 13.7 представлены средние значения ТКС в диапазоне температур $-60 \dots +125$ °С при различных удельных сопротивлениях слоя базы. При эмиттерной диффузии ($R_s=2 \dots 5$ Ом/□) ТКС $\approx 0,02\%$ /К.

Резисторы на основе слоя базы, ограниченного слоем эмиттера (пинч-резисторы). На рис. 13.8 показаны структура пинч-резистора. Для обеспечения закрытого состояния переходов, образующих резистор, напряжение U_z должно быть больше напряжений, подаваемых на контакты резистора.

Расчет сопротивления пинч-резистора производится по формуле (13.7а) в предположении, что боковые границы канала резистора вертикальны. Последнее вносит несущественную погрешность. Для получения более точного значения сопротивления пинч-резистора следует учесть сопротивление контактных площадок [см.

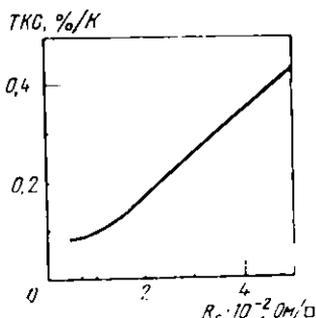


Рис. 13.7. Зависимость ТКС от удельного сопротивления диффузионного p -слоя

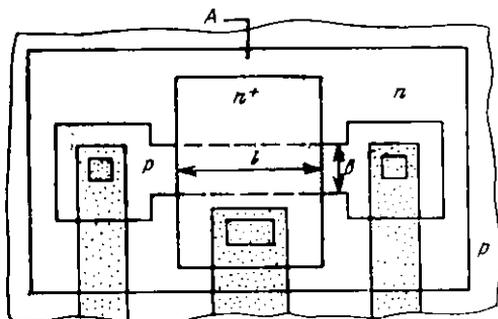
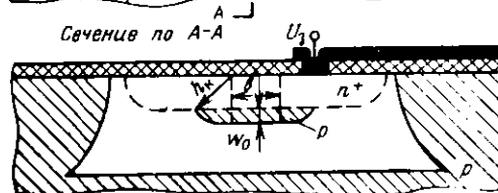


Рис. 13.8. Структура пинч-резистора



(13.9) и участков резистора, не перекрытых эмиттерной диффузией.

Сопротивление пинч-резистора, ввиду малой толщины слоя, его образующего w ($w < w_0 = 0,5 \dots 1,0$ мкм), и большого влияния толщины слоев пространственного заряда на w , в сильной степени зависит от падения напряжения на нем. На рис. 13.9 показана ВАХ пинч-резистора, при построении которой предполагалось, что подложка соединена с электродом резистора, имеющим максимальный потенциал, и U — падение напряжения на резисторе. Участок 1 соответствует линейной характеристике и его наклон определяется (13.7а). На участке 2 происходит смыкание слоев пространственного заряда в канале у электрода резистора, имеющего меньший потенциал, и дифференциальное сопротивление резистора резко возрастает. На участке 3 пробой эмиттерной части перехода, образующего пинч-резистор $U_{проб} = 6 \dots 9$ В, и дифференциальное сопротивление сильно уменьшается. Вид ВАХ и процессы, протекающие в пинч-резисторе, аналогичны ВАХ униполярного транзистора с p - n переходом. Сопротивление пинч-резистора определяется величинами w , h_k и ρ_k . Разброс значений этих величин определяет отклонение сопротивления резистора от номинала. Особенно затруднительно обеспечить повторяемость толщины w при малых ее значениях. Это приводит к тому, что абсолютный разброс сопротивления пинч-резисторов составляет приблизительно 50%. Кроме того, пинч-резистор имеет относительно большой температурный коэффициент ТКС $= 0,3 \dots 0,5\%/K$.

Соотношение (13.7а) и значение удельного сопротивления слоя канала R_s (см. § 11.4) позволяют определить сопротивление пинч-резистора.

Пример. Рассчитать длину пинч-резистора l с $R=200$ кОм при напряжении на контактах равном нулю. Примем: $b=20$ мкм; $\Delta b_c=0,75$ мкм; напряжение $U_s=-2$ В. Будем считать, что $R_s=17$ кОм/□, $h_n=2,4$ мкм; $\omega=0,3$ мкм; $\Delta h_p=0,24$ мкм; $h_{i1}=1,7$ мкм (см. пример § 11.4).

Из (13.7а) с учетом значения Δb_c получим $l=253$ мкм.

Частотные характеристики резисторов. Для нормальной работы резистора необходимо обеспечить закрытое состояние переходов, ограничивающих резистивные области. Эти переходы представляют собой распределенные RC -цепочки.

На рис. 13.10,а представлен соответствующий распределенной RC -структуре четырехполюсник. Токи и напряжения в такой системе связаны следующим отношением в Y параметрах (при металлическом основании полупроводниковой пластины):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11}(s) & y_{12}(s) \\ y_{21}(s) & y_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{s\gamma}}{R} \begin{bmatrix} \operatorname{cth} \sqrt{s\gamma} & -\operatorname{csch} \sqrt{s\gamma} \\ -\operatorname{csch} \sqrt{s\gamma} & \operatorname{cth} \sqrt{s\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13.17)$$

где $s=i\omega$, R и C — сопротивление и емкость резистора, а $\gamma=RC$. Из (13.17) получим для случая короткого замыкания на выходе [$U_2(s)=0$] коэффициент передачи

$$M(s) = -I_2(s)/I_1(s) = -y_{21}(s)/y_{11}(s) = \operatorname{sch} \sqrt{s\gamma}. \quad (13.18)$$

Квадрат модуля и фаза определяется как

$$|M|^{-2} = (\operatorname{ch} 2x + \cos 2x) 2 \quad (13.19a)$$

и

$$\varphi = \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} x \operatorname{th} x), \quad (13.19b)$$

где $x = \sqrt{\omega\gamma}/2$. Из анализа выражений (13.19) следует, что граничная частота ω_0 , соответствующая уменьшению $|M|$ до уровня 0,7:

$$\omega_0 = \pi^2 (4RC) = 2,47 (RC). \quad (13.20)$$

Для определения эквивалентной схемы резистора на частотах $\omega \leq \omega_0$, обозначив $z = \sqrt{s\gamma}$, разложим $y_{11}(s)$ и $y_{21}(s)$ в ряд Маклорена:

$$y_{11}(z) = \frac{1}{R} \left(1 + \frac{z^2}{3} - \frac{z^4}{45} + \dots \right) \quad (13.21a)$$

$$\text{и } y_{21}(z) = -\frac{1}{R} \left(1 - \frac{z^2}{6} + \frac{7z^4}{768} + \dots \right). \quad (13.21b)$$

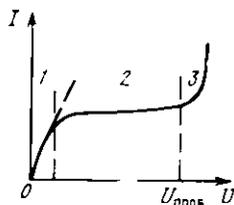


Рис. 13.9. ВАХ тонкого резистора

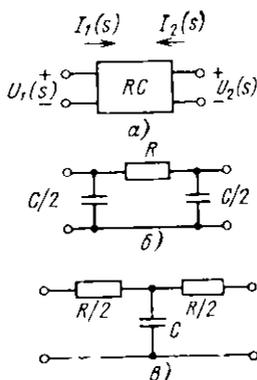


Рис. 13.10. Эквивалентные схемы распределенной RC-структуры: а — четырехполюсник; б — Pi-образная (б) и T-образная (в)

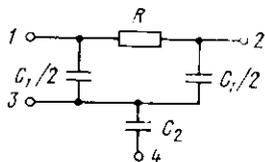


Рис. 13.11. Эквивалентная схема диффузионных резисторов

Ограничившись двумя первыми членами в (13.21) для Π -образной эквивалентности схемы, имеем

$$M(s) \approx -1/(1 + i\omega'\omega'_0) \quad (13.22)$$

где

$$\omega'_0 = 2/(RC). \quad (13.23)$$

Соответствующая эквивалентная схема показана на рис. 13.10, б. Из сравнения формул (13.20) и (13.21) видно, что величины ω_0 и ω'_0 близки. Поэтому эквивалентная схема рис. 13.10, б может использоваться до величин ω , не превышающих ω_0 . Для получения большей точности величину C следует заменить на $8C/\pi^2$. На рис. 13.10, в представлена T-образная эквивалентная схема, дающая те же результаты, что и Π -образная.

На рис. 13.11 представлена обобщенная эквивалентная схема рассмотренных ранее резисторов, в которой эффекты, обусловленные распределенными параметрами, описываются схемой с сосредоточенными параметрами. Емкость C_1 равна суммарной барьерной емкости переходов, ограничивающих резистивную область, R — рассматриваемый резистор и C_2 — емкость изолирующего p - n перехода (если последний не принимает участия в формировании резистивной области). Контакты 1, 2 и 3, 4 — это входная, выходная и выводы эпитаксиальной пленки n -типа и области p -типа соответственно. У резисторов на основе эмиттерного слоя

емкость C_2 в эквивалентной схеме отсутствует. Обычно контакт Z заземлен по переменному сигналу и постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса,

$$\tau_{\text{пр}} = RC_1 \cdot 2. \quad (13.24)$$

Соответствующая частота $f_{\text{пр}}$ определяется по формуле (12.9).

Пример. Рассчитать граничные частоты резисторов с $R=200$ кОм на основе базовой диффузии и пинч-резистора. Полагаем $b=25$ мкм; $h_3=2$ мкм; $h_{\text{к}}=3$ мкм; $R_{\text{бб}}=200$ Ом/□; удельное сопротивление базового слоя, ограниченного эмиттером $R_{\text{сб}}=11,6$ кОм/□; $C_{\text{обз}}=1000$ пФ/мм²; $C_{\text{ок}}=150$ пФ/мм². Будем считать, что резисторы имеют прямоугольную конфигурацию (см. рис. 13.4,а).

Используя приближенную формулу (13.7а) и считая емкость контактов $C_{\text{конт}}=1$ пФ, получаем для резистора на основе базового слоя $l=25400$ мкм, $C_1=160$ пФ и для пинч-резистора $l=430$ мкм, $C_1=10$ пФ. Соответствующие граничные частоты [см. (12.9), (13.24)] равны 10 и 160 кГц для резистора на основе базового слоя и пинч-резистора.

Глава 14. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МДП-МИКРОСХЕМ

14.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МДП-КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсаторы со структурой МДП требуют изготовления тонкого оксида, такого же, как и у МДП-транзисторов. Поэтому их использование в микросхемах на биполярных транзисторах не целесообразно, так как это приводит к усложнению технологии изготовления биполярных микросхем. Применение МДП-конденсаторов целесообразно только в микросхемах на основе МДП-транзисторов.

Идеальный МДП-конденсатор. На рис. 14.1,а показана упрощенная структура МДП-конденсатора. Обычно в качестве диэлектрика этих конденсаторов используется двуокись кремния. Верхняя обкладка конденсатора — металл, нижняя — полупроводник n - или p -типа.

Рассмотрим характеристики идеального конденсатора, в котором не учитываются поверхностные состояния на границе диэлектрик — полупроводник, разность работы выхода структуры диэлектрик — металл — полупроводник и заряд в диэлектрике. Его емкость

$$C = C_d C_n / (C_d + C_n), \quad (14.1)$$

где C_d — емкость, определяемая диэлектриком; C_n — дифференциальная емкость полупроводника. Удельная емкость, определяемая диэлектриком,

$$C_{0d} = \epsilon_d \epsilon_0 h_d, \quad (14.2)$$

где h_d — толщина диэлектрика. Дифференциальная емкость C_n зависит от величины заряда в приповерхностном слое полупроводника и протяженности слоя.

На рис. 14.1,б показана зонная диаграмма границы диэлектрик — полупроводник: φ_n — поверхностный потенциал; $\varphi(x)$ — функция потенциала от координаты [$\varphi(0) = \varphi_n$ и $\varphi(\infty) = 0$]; φ_F — потенциал Ферми; φ_i — потенциал середины запрещенной зоны; $\Delta\varphi_F = \varphi_i - \varphi_F$ вне приповерхностного слоя. Будем полагать, что для полупроводника n -типа $\Delta\varphi_F < 0$ и $\varphi_n < 0$. Если $|\varphi_n|$ увеличивается, то концентрация электронов в поверхностном слое уменьшается и образуется область пространственного заряда толщиной

$$h_n \approx \sqrt{2\epsilon_n \epsilon_0 |\varphi_n| / (qN_d)}. \quad (14.3)$$

При $|\varphi_n| > |\Delta\varphi_F|$ происходит инверсия типа проводимости, а при $|\varphi_n| \geq 2|\Delta\varphi_F|$ — сильное обогащение дырками.

На рис. 14.2 представлена зависимость емкости C (14.1) от внешнего напряжения. Кривая a соответствует статическому режиму. Для плоских зон ($\varphi_n = 0$)

$$C_n = \sqrt{2\epsilon_n \epsilon_0} L_d, \quad (14.4)$$

где $L_d \approx \sqrt{2\epsilon_n \epsilon_0 q_i / (qN_d)}$ — длина Дебая.

При $\varphi_n = -2\Delta\varphi_F$ наступает сильная инверсия и ширина слоя пространственного заряда достигает максимального значения

$$h_{n \max} = 2 \sqrt{\epsilon_n \epsilon_0 |\varphi_F| / (qN_d)}. \quad (14.5)$$

Соответствующее $h_{n \max}$ напряжение (квазипоровое)

$$U'_{\text{пор}} \approx -Q_n C_{0d} / (2\Delta\varphi_F) \approx -qN_d h_{n \max} C_{0d} / 2\Delta\varphi_F, \quad (14.6)$$

где $Q_n = Q_p + qN_d h_{n \max}$ — плотность положительного заряда в приповерхностном слое; Q_p — соответствующая плотность пространственного заряда дырок. В выражении (14.6) полагалось, что $Q_p \ll qN_d h_{n \max}$. Дальнейшее увеличение $|\varphi_n|$ вызывает появление пространственного заряда дырок, экранирующего внутренний слой пространственного заряда, что вызывает возрастание емкости C ($U < 0$). При рабочих частотах $f > 100$ Гц пространственный заряд дырок не успевает отслеживать изменение напряжения, и емкость C не возрастает (рис. 14.2, кривая б, $U < 0$).

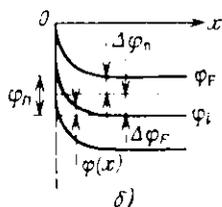
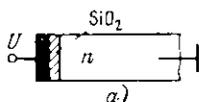


Рис. 14.1. Структура (а) и зонная диаграмма (б) МДП-конденсатора

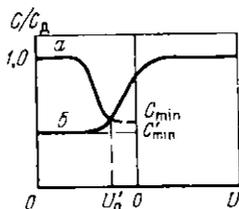


Рис. 14.2. Зависимость относительной емкости МДП-конденсатора от приложенного напряжения

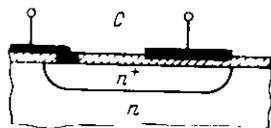


Рис. 14.3. Структура реального МДП-конденсатора

В диапазоне изменения $0 < |q_n| < 2|\Delta q_F|$

$$C_{II} = \epsilon_{II} \epsilon_0 h_{II}. \quad (14.7)$$

Как следует из (14.1),

$$C'_{0 \min} = \epsilon_d \epsilon_0 [h_d + (\epsilon_d \epsilon_{II}) h_{II \max}]. \quad (14.8)$$

Величина Δq_n (см. рис. 14.1, б) находится из соотношения (12.44), а

$$\Delta \varphi_F : \Delta \varphi_n - \varphi_d 2 = -\varphi_d \ln(N_d n_i). \quad (14.9)$$

Реальный МДП-конденсатор. На рис. 14.3 показана структура МДП-конденсатора, используемая в микросхемах (h_d — толщина пленки диэлектрика). Отличие ее от структуры на рис. 14.1 состоит в том, что для уменьшения последовательного сопротивления нижней обкладки конденсатора используется n^+ -слой. Наличие последнего также уменьшает зависимость емкости от внешнего напряжения.

Анализ поверхностных состояний на границе раздела Si—SiO₂ показывает, что их учет эквивалентен введению в (14.6) некоторого заряда $Q_{п.с}$ поверхностных состояний, причем независимо от кристаллографической ориентации, $Q_{п.с} > 0$. В табл. 14.1 представлены значения плотности заряда $Q_{п.с}$ для различных кристаллографических плоскостей. Разность работ выхода структуры металл — полупроводник

$$\Phi_{МП} = \varphi_M - \varphi_n - \varphi_d 2 - \Delta \varphi_F, \quad (14.10)$$

где φ_M и $\varphi_{п.д}$ — работа выхода металла и высота потенциального

Т а б л и ц а 14.1. Плотность заряда поверхностных состояний

| Кристаллографическая плоскость | $\langle 111 \rangle$ | $\langle 110 \rangle$ | $\langle 100 \rangle$ |
|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $(Q_{nc}/q) \cdot 10^{-11}, \text{ см}^{-2}$ | 5,0 | 2,0 | 0,9 |

Т а б л и ц а 14.2. Работа выхода металлов

| Металл | Mg | Al | Ag | Cu | Ni | Au | Pt |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $\varphi_{\text{м}}, \text{ В}$ | 3,7 | 4,3 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,8 | 5,3 |

барьера на границе полупроводник -- диэлектрик. Для кремния Si-SiO₂ $\varphi_{\text{н}}=4,35 \text{ В}$ при $T=300 \text{ К}$. Значения $\varphi_{\text{м}}$ для различных металлов приведены в табл. 14.2. Учет также пространственный заряд, обычно присутствующий в диэлектрике ($Q_{\text{д}}$).

Рассмотренные три фактора влияют на величину $U_{\text{зи пор}}$. С их учетом из (14.6)

$$U_{\text{зи пор}} \approx -(Q_{\text{н}} + Q_{\text{н.с}} + Q_{\text{д}}) C_{\text{од}} + 2 \Delta \varphi_{\text{F}} + \varphi_{\text{МП}}, \quad (14.11a)$$

где $U_{\text{зи пор}}$ -- пороговое напряжение транзистора. Как правило, $Q_{\text{д}} > 0$ и его значение определяется качеством технологического процесса изготовления микросхем. Оно может меняться в довольно широких пределах, ухудшая стабильность $U_{\text{зи пор}}$. Для обеспечения постоянства $U_{\text{зи пор}}$ необходимо, чтобы $Q_{\text{д}} \ll (Q_{\text{н}} + Q_{\text{н.с}})$. Специальные методы стабилизации $Q_{\text{д}}$ позволяют обеспечить $Q_{\text{д}} \leq 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$, что снижает его влияние [$Q_{\text{н.с}} = (1,4 \dots 8,0) \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$, см. табл. 14.1]. Поэтому при оценочных расчетах $Q_{\text{д}}$ можно не учитывать и использовать соотношение

$$U_{\text{зи пор}} \approx -(Q_{\text{н}} + Q_{\text{н.с}}) C_{\text{од}} + 2 \Delta \varphi_{\text{F}} + \varphi_{\text{МП}}. \quad (14.11б)$$

В табл. 14.3 показаны знаки величин, входящих в соотношение (14.11б). В соответствии с выражением (14.11б) наличие $Q_{\text{н.с}}$ и $\varphi_{\text{МП}}$ вызывает сдвиг вольт-фарадной характеристики МДП-конденсатора по оси напряжений.

Т а б л и ц а 14.3. Знаки величин, входящих в соотношение (14.11б)

| Тип проводимости полупроводника | Знаки величин | | | | |
|---------------------------------|------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|
| | $Q_{\text{н.с}}$ | $Q_{\text{н}}$ | $\Delta \varphi_{\text{F}}$ | $\varphi_{\text{МП}}$ | $Q_{\text{д}}$ |
| <i>n</i> | + | + | - | - | - |
| <i>p</i> | - | - | + | + | + |

Иногда используются диэлектрики более сложной структуры: нитрид кремния (Si_3N_4) — двуокись кремния — кремний. При этом для использования формулы (14.2) необходимо заменить ϵ_d на эффективное значение

$$\epsilon_{d,\text{эфф}} = \epsilon_{d1} \epsilon_{d2} h_d / (\epsilon_{d2} h_{d1} + \epsilon_{d1} h_{d2}), \quad (14.12)$$

где ϵ_{d1} , ϵ_{d2} и h_{d1} , h_{d2} — диэлектрические проницаемости и толщины SiO_2 и Si_3N_4 соответственно.

Напряжение пробоя МДП-конденсатора определяется электрической прочностью SiO_2 ; значение критической напряженности электрического поля $E_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^6$ В/см. Погрешность изготовления МДП-конденсатора при $C_n \gg C_d$ определяется технологическими допусками на толщину диэлектрика

$$\Delta C_d / C_d \approx -\Delta h_d / h_d. \quad (14.13)$$

Обычно погрешность близка к 20%. Температурная характеристика МДП-конденсатора определяется температурной зависимостью ϵ_d (см. § 13.1).

Пример. Рассчитать удельную емкость $C_{\text{ед}}$, отношение $C'_{\text{вmin}}/C_{\text{од}}$; пороговое напряжение $U_{\text{нпроб}}$, напряжение пробоя $U_{3\text{проб}}$ МДП-конденсатора со структурой, показанной на рис. 14.3. Диэлектрик — SiO_2 толщиной $h_d = 10^{-5}$ см с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_d = 3,9$. Поверхностную концентрацию донорной примеси $N_{\text{эд}}$ примем равной 10^{19} см $^{-3}$. Контактная площадка выполнена из Al, кристаллографическая ориентация кремния $\langle 111 \rangle$. Считая, что h_n [см. (14.3)] мало, положим $N_d = N_{\text{эд}} = \text{const}$.

Из соотношения (14.2) имеем $C_{\text{од}} = 345$ пФ/мм 2 . Из (14.2) и (14.8)

$$C'_{\text{вmin}} / C_{\text{од}} = [1 + h_n \text{max} \epsilon_d (h_d \epsilon_n)]^{-1}.$$

Согласно (14.8) и (14.9) $\Delta \varphi_F = -0,53$ В и $h_n \text{max} = 1,17 \cdot 10^{-6}$ см. Тогда $C'_{\text{вmin}}/C_{\text{од}} = 0,96$. Из (14.10) и табл. 14.2 имеем $\varphi_m = 4,3$ В и $\varphi_{\text{min}} = 0,08$ В. С учетом (14.11б) и табл. 14.1 ($U_{\text{нпроб}} = -58$ В (при $Q_{\text{ле}} = 5 \cdot 10^{11}$ q), $U_{3\text{проб}} = E_{\text{кр}} h_d \approx 60$ В). Из рассчитанных значений следует, что в допробной области ($|U| < 60$ В) при $N_{\text{эд}} \geq 10^{19}$ см $^{-3}$ конденсатор обладает высокой стабильностью ($C'_{\text{вmin}}/C_{\text{од}} = 0,96$).

14.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МДП-ТРАНЗИСТОРОВ

Наибольшее распространение в микросхемах на основе МДП-транзисторов получили транзисторы с индуцированным каналом.

Электрические характеристики. На рис. 14.1 показана структура МДП-транзистора с p -типа каналом. Канал обозначен на рисунке штриховой линией. Обычно электрод истока соединен с полупроводниковой пластиной. На рис. 14.4 представлена выходная ВАХ транзистора.

Обычно выходная характеристика МДП-транзистора имеет вид

$$I_C = b [(U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}) U_{СИ} - U_{СИ}^2/2], \quad (14.14)$$

где b — удельная крутизна

$$b = \epsilon_d \epsilon_0 \mu_p z (L h_d), \quad (14.15)$$

а $U_{3И}$, $U_{СИ}$ — напряжение между затвором и истоком, стоком и истоком соответственно; $U_{3И\text{ пор}}$ — пороговое напряжение; z — ширина канала; L — длина канала; h_d — толщина толстого подзатворного оклада. Напряжение, соответствующее началу области насыщения (пологий участок ВАХ),

$$U_{СИ\text{ нас}} = U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}. \quad (14.16)$$

При $|U_{СИ}| \geq |U_{СИ\text{ нас}}|$ транзистор работает в области насыщения. Подставляя (14.16) в (14.14), получаем ВАХ

$$I_C = b (U_{3И} - U_{3И\text{ пор}})^2/2, \quad (14.17)$$

соответствующую области насыщения.

Из (14.17) найдем крутизну транзистора на пологом участке

$$S = dI_C/dU_{3И} = b (U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}) \quad (14.18a)$$

или

$$S = \sqrt{2bI_C}. \quad (14.18b)$$

Дифференцируя выражение (14.14) по $U_{СИ}$, получаем дифференциальное сопротивление транзистора на крутом участке

$$R_i = [b |U_{3И} - U_{3И\text{ пор}} - U_{СИ}|]^{-1}, \quad (14.19)$$

а при $|U_{СИ}| \ll |U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}|$ сопротивление канала

$$R_0 = [b |U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}|]^{-1}. \quad (14.20)$$

Быстродействие МДП-транзистора определяется двумя основными параметрами: временем пролета носителей через канал $t_k = L/V_{0,c}$ (см. § 12.1) и постоянной времени заряда емкости затвора через сопротивление канала (τ_s). Обычно t_k существенно меньше τ_s и поэтому t_k пренебрегают. Величина τ_s (постоянной времени крутизны) запишется как

$$\tau_s = R_0 C_a = L^2 [\mu_p |U_{3И} - U_{3И\text{ пор}}|], \quad (14.21)$$

где емкость затвора

$$C_a = \epsilon_0 \epsilon_d z L h_d. \quad (14.22)$$

В качестве материала затвора могут использоваться не только металлы, но и высоколегированный поликристаллический кремний. Для последнего (см. (14.10)), где

$$\Phi_{МДП} = \Delta\Phi_{пв} - \Delta\Phi_{пг}, \quad (14.23)$$

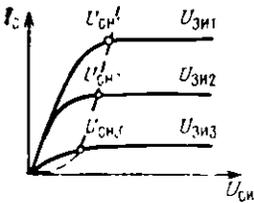
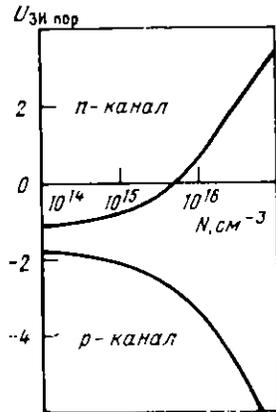


Рис. 14.1 Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Рис. 14.5. Зависимость пороговых напряжений МДП-транзистора от концентрации примесей в полупроводниковой подложке



где $\Delta\varphi_{Fнк}$ и $\Delta\varphi_{Fк}$ — разности потенциалов между средней запрещенной зоны и уровнями Ферми [см. (14.9)] для поликристаллического кремниевого затвора и полупроводниковой пластины. Меняя значения $\Delta\varphi_{Fнк}$ и $\Delta\varphi_{Fк}$, можно управлять пороговым напряжением, в частности уменьшать $|U_{ГИ пор}|$ в p -канальных транзисторах.

Пример. Рассчитать значения пороговых напряжений транзисторов с каналами n - и p -типов, изготовленных на кремнии с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$. Будем считать, что концентрация примесей $10^{14} \leq N \leq 10^{17} \text{ см}^{-3}$; электрод затвора выполнен из Al , толщина подзатворного оксида (SiO_2) $h_d = 10^{-5} \text{ см}$. Примем $Q_d = 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$.

Для кремния n -типа (канал p -типа) с концентрацией доноров $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ из (14.9) имеем $\Delta\varphi_F = -0.29 \text{ В}$. Из (14.6) при $\epsilon_n = 11,7$ и $\epsilon_o = 8,85 \cdot 10^{14} \text{ Ф/см}$ получим $Q_{п.с} = 1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Значения $Q_{п.с} = 1,44 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ и $\varphi_{МП} = 0,32 \text{ В}$ [см. табл. 14.1, 14.2 и (14.10)]. Тогда из (14.11б) при $C_{од} = 3,45 \times 10^{-7} \text{ Ф/см}^2$ (см. пример § 14.1) $U_{ГИ пор} = -2,01 \text{ В}$. Для кремния p -типа (канал n -типа) с концентрацией акцепторов $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, используя те же выражения и таблицы, $\Delta\varphi_F = 0,29 \text{ В}$, $\varphi_{МП} = -0,9 \text{ В}$, $Q_{п.с} = -1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Значение порогового напряжения $U_{ГИ пор} = -0,62 \text{ В}$. Аналогично можно получить значения пороговых напряжений для МДП-транзисторов, изготовленных на кремнии с другими значениями концентраций примесей. Результаты вычислений показаны на рис. 14.5. Из рисунка видно, что у n -канальных транзисторов при $N_d \leq 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ канал встроенный.

Температурная зависимость параметров. Рассмотрим температурные зависимости порогового напряжения $U_{ГИ пор}$, удельной крутизны и тока стока в области насыщения.

Температурные зависимости параметров МДП-транзистора определяются, в основном, температурными характеристиками собственной концентрации носителей и подвижности. Собственная концентрация

$$n_i = 3,7 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp[-\varphi_{30}/(2q_T)], \quad (14.24)$$

где φ_{30} — ширина запрещенной зоны при $T=0$ К. Подвижность

$$\mu = \mu_0 T_0/T, \quad (14.25)$$

где μ_0 — подвижность при температуре T_0 . Влияние изменения ширины запрещенной зоны и диэлектрической проницаемости, как показывает анализ, оказывают существенно меньшее влияние.

В температурной зависимости напряжений $U_{3И}$ и $U_{3И\text{пор}}$ определяющую роль играет изменение значений $\Delta\varphi_F$ и Q_n . Используя соотношение (14.5), (14.9) и (14.24), получим

$$dU_{3И\text{пор}}/dT = (d\Delta\varphi_F/dT) [2 + Q_n (2C_{0д}/\Delta\varphi_F)], \quad (14.26)$$

где

$$d\Delta\varphi_F/dT = (\varphi_{30}/2 + \Delta\varphi_F)/T. \quad (14.27)$$

Из выражения (14.15), используя (14.25), имеем

$$db/dT = -b/T, \quad (14.28)$$

где b — удельная крутизна при температуре T .

Температурную характеристику тока стока в режиме насыщения получим из (14.17), используя (14.28),

$$dI_C/dT = I_C [-1/T - 2(dU_{3И\text{пор}}/dT)(U_{3И} - U_{3И\text{пор}})]. \quad (14.29)$$

Из анализа выражений (14.26), (14.27) следует, что при учете полярности напряжений $U_{3И}$ и $U_{3И\text{пор}}$ слагаемые в прямых скобках формулы (14.29) имеют различные знаки и при некотором напряжении $U_{3И}$ $dI_C/dT=0$.

Пример. Рассчитать значения $dU_{3И\text{пор}}/dT$ и напряжение $U_{3И}$, при котором $dI_C/dT=0$ для транзистора с каналом p -типа. Примем: используется кремний n -типа с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$; $T=300$ К; $N_A=10^{15}$ см $^{-3}$; толщина податворного оклада (SiO_2) $h_d=10^{-5}$ см.

Из примера § 14.2 имеем $\Delta\varphi_F = -0,29$ В; $U_{3И\text{пор}} = -2,01$ В; $Q_n = 1,39 \times 10^{-8}$ Кл/см 2 ; $C_{0д} = 3,45 \cdot 10^{-8}$ Ф/см 2 . Используя соотношения (14.26), (14.27) имеем $d\Delta\varphi_F/dT = 10^{-3}$ В/К и

$$dU_{3И\text{пор}}/dT = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ В/К},$$

Из выражения (14.29) следует, что $dI_C/dT=0$. При

$$U_{3И} - U_{3И\text{пор}} = -1/T dU_{3И\text{пор}}/dT = -3,6 \text{ В}.$$

Резисторы на основе МДП-транзистора. В микросхемах на основе МДП-транзисторов в качестве резисторов обычно используются сами МДП-транзисторы. Как указывалось выше, сопротивление слоев диффузионных областей в p -канальных транзисторах $R_c = 50 \dots 150 \text{ Ом}/\square$, в то время как удельное сопротивление слоев канала составляет десятки килоом на квадрат. Это позволяет существенно уменьшить площадь, занимаемую резистором.

При использовании таких резисторов МДП-транзистор включается по схеме с общим стоком. На стоке поддерживается напряжение E_c , а на затворе E_d . Различают два случая: $|E_d - U_{\text{зи пор}}| \leq |E_c|$ и $|E_d - U_{\text{зи пор}}| > |E_c|$. В первом МДП-транзистор работает в пологой области ВАХ, во втором — в крутой. Используя уравнения (14.2), (14.15), (14.19), (14.20), получаем уравнения для дифференциального сопротивления МДП-резистора: для пологого участка ВАХ

$$R_{\text{д.л}} = L [z \mu C_{\text{од}} |U_{\text{зи пор}}| (U_{\text{си}} U_{\text{зи пор}} - 1)]^{-1}, \quad (14.30a)$$

для крутого участка ВАХ

$$R_{\text{д.к}} = L [z \mu C_{\text{од}} |U_{\text{зи пор}}| (U_{\text{си}} U_{\text{зи пор}} + \Delta E U_{\text{зи пор}} - 1)]^{-1}, \quad (14.30b)$$

где $\Delta E = E_d - E_c$. Для увеличения R_d значение L/z должно быть равно 1...10. Из (14.30) видно, что выражение (14.30b) отличается от (14.30a) сдвигом характеристики при $U_{\text{си}}/U_{\text{зи пор}} = 0$ на величину $\Delta E/U_{\text{зи пор}}$. Из (14.30) также следует нелинейная зависимость сопротивлений от напряжения. Однако этот недостаток, если он оказывает отрицательное влияние на микросхему, исправляется схемотехнически.

Пример. Рассчитать зависимости дифференциальных сопротивлений $R_{\text{д.л}}$ и $R_{\text{д.к}}$ для p -канального транзистора. Примем: $\mu_p = 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, $U_{\text{зи пор}} = -2,5 \text{ В}$, $C_{\text{од}} = 3,45 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}/\text{см}^2$ ($h_d = 10^{-5} \text{ см}$); $L/z = 1$, а $\Delta E/U_{\text{зи пор}} = 0; 1,5$.

Из (14.30a) имеем при $\Delta E/U_{\text{зи пор}} = 0$

$$R_{\text{д.л}} = 58 (U_{\text{си}} U_{\text{зи пор}} - 1)^{-1} \text{ кОм},$$

а из (14.30b) при $\Delta E/U_{\text{зи пор}} = 1,5$

$$R_{\text{д.к}} = 58 (U_{\text{си}} U_{\text{зи пор}} + 0,5)^{-1} \text{ кОм}.$$

14.3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ

Приборы с зарядовой связью (ПЗС) представляют собой матрицы близко расположенных к друг другу МДП-конденсаторов (рис. 14.6,а). В отличие от статических МДП-структур (см. § 14.1) информация в ПЗС-элементах хранится относительно короткий

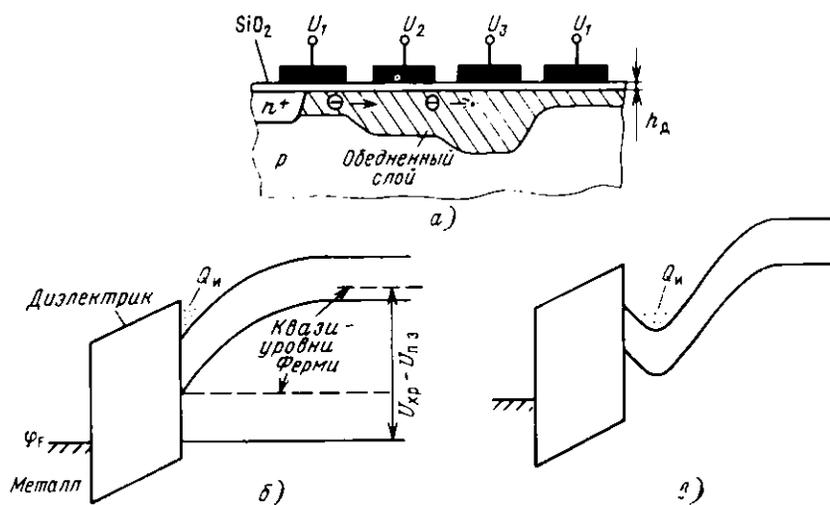


Рис. 14.6. Структура ПЗС (а) и потенциальные диаграммы ПЗС с поверхностным (б) и скрытым (в) каналами

срок (до нескольких миллисекунд). Соответствующие последовательности тактовых импульсов на затворах такой матрицы смещают ее отдельные МДП-конденсаторы в режим глубокого обеднения. Обедненные области этих структур, расположенных на общем диэлектрическом слое SiO_2 , перекрываются. Информационный заряд хранится под электродами матрицы и контролируемым образом перемещается вдоль поверхности кристалла, перетекая из-под одних электродов к соседним. На рис. 14.6,а показаны три состояния ПЗС: отсутствие информации (при $U=U_1$), хранение информации (при $U=U_2=U_{xp}$) и запись информации (при $U=U_3=U_{xp}$). При подаче напряжения $U_3 > U_2$ ($U_{ап} > U_{xp}$) заряд перетекает из одного МДП-конденсатора к другому. Источником первоначального заряда в ПЗС n -типа является n^+ -область. В статических МДП-структурах с каналом n -типа электроны поступают в канал из высоколегированной области истока.

Основными типами ПЗС являются ПЗС с поверхностным и скрытым каналами. На рис. 14.6,б,в представлены их зонные диаграммы. В ПЗС с поверхностным каналом заряд хранится и переносится у границы раздела полупроводник — диэлектрик. В ПЗС со скрытым каналом тонкий поверхностный слой полупроводника дополнительно легируют (это устраняет влияние поверхностных состояний) и заряд хранится и переносится на некотором удалении от границы раздела. При разработке конкретных микро-

схем на ПЗС (в зависимости от их назначения) применяются различные схемы организации тактового питания и взаимного расположения затворов. Работают ПЗС в двух основных режимах: хранение и запись (передача) информации. Первый характеризуется напряжением U_{xp} и временем хранения t_{xp} , а второй — напряжением записи и временем передачи ($U_{зап}$ и $t_{пер}$).

Хранение информационного заряда осуществляется в режиме сильной инверсии. Граничное напряжение на МДП-структуре, при котором начинается режим сильной инверсии, совпадает с пороговым напряжением $U_{пор}$ МДП-транзистора. Поэтому эффективное напряжение хранения может быть выражено следующим соотношением:

$$U_{xp,эф} = U_{xp} - U_{пор}.$$

Чем больше значение $U_{xp,эф}$, тем надежнее работает ПЗС.

Значение

$$U_{xp} \approx 2 U_{зап} \quad (14.31a)$$

а

$$U_{зап} = \left(\frac{1}{5} \dots \frac{1}{3} \right) U_{проб}, \quad (14.31b)$$

где $U_{проб} = E_{кр} h_d$ — напряжение пробоя тонкого диэлектрика под электродами ПЗС (h_d), $E_{кр}$ — критическая напряженность электрического поля (см. § 14.1).

Рассмотрим подробнее ПЗС с поверхностным каналом. Время хранения информации ограничивается процессом термогенерации, при котором накапливается паразитный заряд, а также происходит рекомбинация и диффузия информационного заряда. В этом процессе участвуют как поверхностные состояния, так и генерационно-рекомбинационные центры в приповерхностной области полупроводника. Плотность темнового тока

$$j_T = qn_i [h_{но} 2 \tau_n + D_n n_i (L_n N_a) + S 2], \quad (14.32)$$

где $h_{но}$ — толщина области пространственного заряда при пустой потенциальной яме (см. § 14.1) и τ_n — время жизни неосновных носителей в той же области; D_n и L_n — коэффициент диффузии и диффузионная длина неосновных носителей в подложке; N_a — концентрация акцепторов в подложке и S — скорость поверхностной рекомбинации. В (14.32) первое слагаемое в скобках определяет ток, обусловленный объемной генерацией в обедненном слое; второе — диффузионный ток генерации неосновных носителей в электронейтральной части подложки, поступающих через область обеднения в инверсионный слой, и третье — ток поверх-

постной рекомбинации. Как показывают оценки, основной вклад в j_T вносит первое слагаемое. Величина

$$t_{xp} = Q_n j_T, \quad (14.33)$$

где Q_n — информационный заряд.

Толщина h_{no} определяется из соотношения (14.3) при $\varphi_n = \varphi_{no}$, а φ_{no} — поверхностный потенциал при $Q_n = 0$. Величина φ_{no} находится из уравнения

$$U_{xp} - U_{n,z} = \varphi_{no} - Q_{no} C_{од}, \quad (14.34a)$$

где заряд $Q_{no} = -qh_{no}N_A$ и $U_{n,z}$ — напряжение плоских зон (см. § 14.1):

$$U_{n,z} = (Q_d + Q_{n,c}) C_{од} + \varphi_{МП}. \quad (14.34b)$$

Когда в потенциальной яме появляется заряд Q_n , происходит изменение поверхностного потенциала (φ_n):

$$\Delta\varphi_n = \varphi_n - \varphi_{no} = j_T N (pf C_{од} \xi), \quad (14.35)$$

где N — количество ПЗС, p — число фаз, f — тактовая частота и ξ — доля информационного заряда, теряемого при переносе заряда к следующему ПЗС. Величина заряда

$$Q_n = \Delta\varphi_n C_{од}. \quad (14.36)$$

Для относительно малого Q_n доминирующим механизмом переноса является термодиффузия. Процесс переноса носит экспоненциальный характер. Скорость диффузионного стекания характеризуется постоянной времени

$$\tau_d = 4L^2 (\pi^2 D_n), \quad (14.37)$$

где L — длина контакта ПЗС.

Время прохождения межконтактного расстояния за счет краевого поля существенно меньше.

Пример. Рассчитать основные параметры ПЗС-матрицы, имеющей трехфазную структуру с числом элементов 128, тактовой частотой 1 МГц. Длина контакта ПЗС 4 мкм и расстояние между ними 1 мкм. Матрица изготовлена на Si p -типа с кристаллографической ориентацией $\langle 111 \rangle$, концентрация $N_A = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $\tau_n = 10 \text{ нс}$ и $h_d = 0,1 \text{ мкм}$, $\xi = 10^{-1}$ ($\varphi_{МП} = 0$).

На рис. 11.5 имеем $\mu_n \approx 1000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Используя соотношения (14.2) и (14.3), (14.31) — (14.37), табл. 14.1 и $E_{кр} = 6 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ (см. § 14.1), получим $U_{проб} = 60 \text{ В}$. При коэффициенте в выражении (14.31б), равном 0,25 $U_{n,z} = 15 \text{ В}$; $U_{xp} = 10 \text{ В}$; $U_{n,z} = 2,6 \text{ В}$; $\varphi_{no} = 10 \text{ В}$; $h_{no} = 3,8 \text{ мкм}$; $j_T = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$; $Q_n = 20 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/см}^2$; $\Delta\varphi_n = 5,6 \cdot 10^{-2} \text{ В}$ и $t_{xp} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$. Последнее определяет нижнюю граничную частоту порядка килогерц. Значение $\tau_d \approx 2,5 \text{ нс}$. Данное τ_d соответствует максимальной тактовой частоте порядка 20 МГц.

14.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕЖЭЛЕМЕНТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В табл. 14.4 представлены значения относительных удельных сопротивлений некоторых металлов.

Обычно в полупроводниковых микросхемах в качестве межэлементных соединений применяются проводники из пленки алюминия. Для исключения пересечений проводников используются три основных метода: многослойная металлизация, прокладка шин металлизации над каналами резисторов, защищенными слоем SiO_2 (рис. 14.7,а) и проводящие диффузионные перемычки под слоем двуокиси кремния (рис. 14.7,б).

Таблица 14.4. Значения относительных удельных сопротивлений металлов

| Металл | Cu | Ag | Au | Al | Cr | W | Ni | Pt | Ta |
|----------------------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| $\rho_{\text{медь}}$ | 1 | 0,94 | 1,3 | 1,6 | 1,8 | 3,2 | 4,1 | 5,9 | 10 |

Примечание: $\rho_{\text{медь}}$ и ρ_{Al} — удельные сопротивления металла и меди соответственно ($\rho_{\text{медь}} = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·см).

Шины металлизации. Минимальная ширина металлизированной дорожки (при заданной ее толщине) определяется допустимой плотностью тока $(2,0 \dots 2,5) \cdot 10^5$ А/см². Толщина слоя Al шин металлизации составляет порядка 1,5 мкм и шина имеет удельное сопротивление слоя $R_s \approx 0,05$ Ом/□. Значение R_s для пленки приблизительно в 2,5 ... 3 раза превышает значение, получаемое из удельного сопротивления Al ($\rho = 2,9 \cdot 10^{-8}$ Ом·см). Указанные плотности токов определяются конечным временем безотказной работы межэлементных соединений:

$$t_G = \kappa_0 A j^{-2} \exp(E/\kappa T),$$

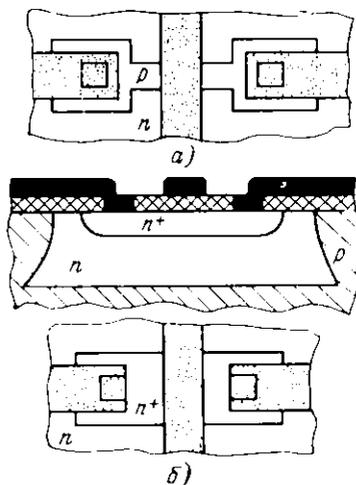


Рис. 14.7. Прокладка шин металлизации над каналом резистора (а) и через n^+ -перемычку (б)

где $\kappa_0 = 10^{12}$ А·с/см⁶; A — площадь поперечного сечения соединительной шины; j — плотность тока; $E = 1,2$ эВ. Это связано с миграцией Al от коллекторных контактов выходных транзисторов, что повышает сопротивление тела коллектора, рост штейн Al, приводящий к закорачиванию эмиттерных p - n переходов и др. При $j = 2,5 \cdot 10^5$ А/см², ширине соединительной шины 10 мкм, температуре 400 К ($\approx 130^\circ\text{C}$) и толщине слоя Al 1,5 мкм $t_6 \approx 80$ лет. Однако надо учитывать, что это вероятностный процесс, а число контактов в микросхемах достаточно велико.

Металлизированные дорожки вносят паразитные элементы: сопротивление, емкости и индуктивности. Рассмотрим их подробнее.

Активные потери определяются сопротивлением металлизированных шин R_0 и вихревыми токами, возникающими в полупроводнике при протекании через металлизированные шины переменного тока (R_n). Суммарное паразитное активное сопротивление

$$R_u = R_0 + R_n. \quad (14.38)$$

где $R_0 = R_s l / b$, а l — длина шины и b — ее ширина. Выражение для определения R_n находилось при следующих предположениях: краевые эффекты незначительны; электромагнитное поле сосредоточено под шиной металлизации; полупроводниковая пластина состоит из двух слоев толщиной h_1 и h_2 с удельной проводимостью σ_1 и σ_2 соответственно; пластина имеет металлическое основание. Тогда потери в подложке, приведенные к шине металлизации

$$R_n = l b \times \begin{cases} [\mu_0 \omega (h_1 + h_2)]^2 (\mu_1^2 \sigma_1 h_1 + \mu_2^2 \sigma_2 h_2) / 3 & \text{при } \delta_1 \gg h_1, \delta_2 \gg h_2, \\ & \sigma_1 \gg \sigma_2; \\ (\sigma_1 h_1 + 0,5 \sigma_2 \delta_2) (\sigma_1 h_1 + \sigma_2 \delta_2)^2 & \text{при } \delta_1 \ll h_1, \delta_2 \leq 0,5 h_2, \sigma_1 \geq \sigma_2; \\ (2 \sigma_1 \delta_1)^{-1} & \text{при } \delta_1 \leq 0,5 h_1, \end{cases} \quad (14.39)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; μ_1 и μ_2 — относительные магнитные проницаемости полупроводника ($\mu_1 = \mu_2 = 1$); ω — частота передаваемого сигнала; $\delta = 1/\alpha$ — глубина проникновения поля в полупроводник, а

$$\alpha = \left\{ \frac{\omega^2 \epsilon_{11} \epsilon_0 \mu_0}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_{11} \epsilon_0} \right)^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (14.40)$$

коэффициент затухания поля.

Паразитная емкость металлизированной дорожки C_n , отнесенная к ее длине, определяется с помощью соотношения (14.2) и составляет

$$C_n l = \epsilon_d \epsilon_0 b h_d. \quad (14.41)$$

Величину паразитной индуктивности (L_n) на единицу длины можно представить как

$$L_n l \approx (\mu_0 / 2) \{ b (2 h_d) + (1/\pi) \ln [2 \pi e (b h_d + 0,94)] \}^{-1}, \quad (14.42a)$$

где e — основание натурального логарифма. Соотношение (14.42a) дает несколько заниженное значение индуктивности, так как оно справедливо при удельном сопротивлении полупроводника, близком к удельному сопротивлению металла. При реальных значениях параметров в соотношении (14.42a) можно пренебречь членом, содержащим логарифм. Тогда

$$L_n l \approx \mu_0 h_d / b. \quad (14.42b)$$

Как следует из анализа выражений (14.38)—(14.42), основное паразитное влияние оказывает R_n и C_n . Кроме того, для реальных структур эпитаксиальных пленок и рабочих частот $f \leq \leq 10$ ГГц справедлива верхняя строка в формулах (14.39), которую можно представить как

$$R_n = l K f^2 / b, \quad (14.43)$$

где $K = [2 \mu_0 \pi (h_1 + h_2)]^2 (\sigma_1 h_1 + \sigma_2 h_2 / 3)$. По аналогии с диффузионным резистором (см. § 13.2) шину можно характеризовать частотой f_0 , на которой амплитуда тока, передаваемого по шине, ослабляется до 0,7 исходного значения. Используя (13.24), (14.38), (14.41) и (14.43), получим постоянную времени

$$\tau_0 = R_n C_n / 2 = C_{0n} l^2 (R_s + K f_0^2) / 2, \quad (14.44)$$

а C_{0n} — удельная паразитная емкость шины. Тогда f_0 [см. (12.9)] определяется из решения следующего уравнения:

$$f_0^4 + (R_s / K) f_0^2 - 1 / (\pi K C_{0n} l^2) = 0. \quad (14.45)$$

Из оценочных расчетов следует, что (14.45) имеет одно решение $f_0 > 0$, находящееся по формуле Кардана.

Пример. Рассчитать минимальную ширину металлизированной дорожки (b) при максимальном токе $I = 30$ мА и толщине металлизации $h_d = 1,5$ мкм. Для найденного значения b определить также значения паразитных параметров (R_n , C_n , L_n), отнесенные к единице длины и сопротивления паразитных элементов на частотах $f = 100$ МГц; 10 ГГц и значение f_0 . Примем, что $R_s = 0,05$ Ом/□; $h_1 = 5$ мкм; $\rho_1 = 0,5$ Ом·см; $h_2 = 245$ мкм; $\rho_2 = 10$ Ом·см; $h_d = 0,5$ мкм; $\epsilon_d = 3,9$; $\epsilon_n = 11,7$; допустимая плотность тока через шину $j_d = 2 \cdot 10^5$ А/см².

Ширина шины $b = l / (j_d h_m)$. Значения $R_0/l = 50$ Ом, $C_n/l = 6,9$ пФ/см и $L_n/l \approx 0,63$ нГн/см [см. (14.41), (14.42)]. При $f = 100$ МГц [см. (14.39)] $R_n/l = 0,071$ Ом/см, $l / (\omega C_n) = 231$ Ом·см и $\omega L_n/l = 0,4$ Ом/см. При $f = 10$ ГГц $R_n/l = 710$ Ом/см, $l / (\omega C_n) \approx 2,3$ Ом·см и $\omega L_n/l \approx 40$ Ом/см. Для $l = 1$ см из (14.42) имеем $f \approx 830$ МГц.

Многослойная металлизация. При многослойной металлизации первый металлический слой в микросхеме закрывается слоем диэлектрика, на который затем наносится второй слой металла. Контактное соединение между металлическими слоями осуществляется через отверстия в разделительном диэлектрике. Наибольшее распространение в качестве межслойного диэлектрика получили SiO, SiO₂ и Al₂O₃. Окись алюминия изготавливается анодным окислением. Минимальная толщина диэлектрических пленок для обеспечения требуемой изоляции и исключения пор составляет 0,5 мкм. В настоящее время широко используется только два слоя металлизации, хотя возможно использовать три и даже четыре. Многослойная металлизация позволяет уменьшить длину и упростить конфигурации металлизированных дорожек.

Для определения параметров паразитных элементов, возникающих при многослойной металлизации, используются соотношения (14.38) – (14.42) и (14.45). При применении в качестве межслойного диэлектрика не SiO₂ в соотношении (14.40) необходимо заменить ϵ_d на $\epsilon_{д,эф}$ [см. (14.12) и § 14.1].

Диффузионные перемычки. Такие перемычки позволяют обойтись без двухслойной металлизации при необходимости исключить пересечения проводников.

На рис. 14.7,б представлена диффузионная перемычка, используемая при однослойной металлизации в схемах на МДП-транзисторах с каналом *n*-типа. Сопротивление и паразитная емкость, вносимые перемычкой, определяются в соответствии с методикой, данной в § 13.2. Следует отметить, что для изготовления перемычек в схемах на *p*-канальных МДП-транзисторах используется диффузионная область *p*-типа. Последняя характеризуется большим удельным сопротивлением слоя, чем удельное сопротивление слоя *n*⁺-перемычки. Следовательно, сопротивление перемычки в микросхемах на *p*-канальных и МДП-транзисторах существенно больше, чем в микросхемах на *n*-канальных МДП-транзисторах. В микросхемах на биполярных транзисторах для перемычки используется *n*⁺-слой, расположенный в отдельной области. Площадь, занимаемая перемычкой, приблизительно равна площади транзистора с минимальными геометрическими размерами. Величина вносимого сопротивления $R = 5 \dots 15$ Ом в зависимости от геометрических размеров перемычки.

Глава 15. КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

15.1. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Наиболее важной стадией разработки (проектирования) полупроводниковых микросхем является трансформация их электрической схемы в топологическую. При этом определяются взаимное расположение элементов и их коммутация.

Главное требование при разработке топологии — максимальная плотность упаковки элементов при минимальном количестве пересечений межэлементных соединений. При этом обеспечивается оптимальное использование площади кристалла при выполнении всех конструктивных и технологических требований и ограничений. Разработка топологии носит индивидуальный характер и ее успешное выполнение во многом зависит от квалификации исполнителя. Следует отметить необходимость тесного контакта топологов с разработчиками электрической схемы. Исходными данными при разработке топологии являются принципиальная электрическая схема, технологические и конструктивные требования и ограничения.

Разработку топологии можно разделить на ряд этапов: получение исходных данных; расчет геометрических размеров активных и пассивных элементов; разработка эскиза топологии; разработка предварительных вариантов топологии; выбор окончательного варианта топологии и его оптимизация. Указанные этапы в полном объеме используются при разработке полупроводниковых микросхем. Рассмотрим каждый из этих этапов.

Получение исходных данных. Исходные данные можно разделить на два класса: электрические; конструктивные и технологические (для базового технологического процесса). К электрическим данным относятся: принципиальная электрическая схема; требования к электрическим параметрам (напряжение питания и его разброс, параметры входных и выходных сигналов, рабочий диапазон температур и др.); перечень активных и пассивных элементов и требования к ним (номинал, допуск, рассеиваемая мощность, максимальный рабочий ток и др.); допустимые значения и допустимые места расположения паразитных емкостей и сопро-

тивлений. К конструктивным и технологическим данным относятся: порядок расположения на кристалле внешних контактных площадок (вынесенных на края кристалла), соответствующий разводке выводов в корпусе (если такое ограничение накладыва-ется); тип корпуса; минимальные геометрические размеры элемен-тов и разброс номиналов элементов; параметры технологических режимов (поверхностные концентрации, глубины залегания p - n переходов, толщины диэлектрических пленок) и их разброс.

Расчет геометрических размеров активных и пассивных эле-ментов. На этом этапе руководствуются электрическими, конст-руктивными и технологическими данными. Допускается использо-вание ранее разработанных элементов для других микросхем, ес-ли элементы имеют параметры, соответствующие электрическим требованиям и предполагают использование того же технологиче-ского процесса, что и в проектируемой полупроводниковой микро-схеме.

Если базовый технологический процесс не обеспечивает за-данных требований к активным и пассивным элементам, то его корректируют.

Разработка эскиза топологии. Исходными данными являются принципиальная электрическая схема с заданным расположением контактных площадок и геометрические размеры элементов. На этом этапе решаются такие вопросы, как определение необходимо-го числа изолированных областей, минимизация возможного чис-ла пересечений коммутационных шин элементов и длины шин. При определении необходимого числа изолированных областей следует предусматривать закрытое состояние p - n переходов, об-разующих резисторы. Это в первую очередь относится к наиболее широко распространенным резисторам на основе базового слоя n - p - n транзистора и конденсаторам (последние редко используются в полупроводниковых микросхемах, поэтому в дальнейшем бу-дем учитывать только резисторы). Кроме того, следует учитывать следующие соображения: все транзисторы, имеющие различные потенциалы коллекторов, должны быть изолированы; все резисто-ры могут быть размещены в одной изолированной области, имею-щей максимальный потенциал в схеме; резисторы, включенные в эмиттерные цепи транзисторов, можно объединять с последними в одну изолированную область; на p -область изолирующего перехо-да должен быть подан минимальный потенциал. Для улучшения развязки между коллекторными изолированными областями тран-зисторов контакт к p -области целесообразно делать рядом с наи-более мощным транзистором.

В некоторых микросхемах, в частности в микросхемах памяти имеется большое количество повторяющихся групп элементов (ячейки памяти). Рекомендуется начинать разработку с отдельной

группы, а затем объединять их в один эскиз. Внешние контактные площадки, вынесенные на края кристалла из-за большого размера (75×75 мкм²), целесообразно размещать над отдельными изолированными областями для уменьшения результирующей паразитной емкости (последовательное соединение емкостей диэлектрика и изолирующего *p-n* перехода) и исключения опасности коротких замыканий при дефекте в окисле.

Окончательный эскиз топологии согласуется топологом с разработчиком схемы для выяснения возможности изменения порядка расположения внешних контактных площадок, использовании *n⁺*-перемычек и изменения геометрии транзисторов для прокладки межэлементных соединений (удаление контакта к коллектору от коллекторного *p-n* перехода и др.). Использование *n⁺*-перемычек недопустимо в шинах питания и «земли», так как приводит к смещению всех уровней напряжения в микросхеме и может привести к неработоспособности последней. Обычно прорабатывается несколько вариантов эскиза топологии.

Разработка предварительных вариантов топологии. На этом этапе топологический чертеж вычерчивается в соответствии с эскизом на бумаге с координатной сеткой в масштабе 100 : 1, 200 : 1 или другом масштабе, размером 100. Обычно топология проектируется в прямоугольной системе координат. Отклонение от параллельности допустимо лишь тогда, когда существенно упрощается форма элемента. В первую очередь это относится к шинам металлизации. Координаты всех точек, расположенных в вершинах углов ломаных линий, должны быть кратны шагу координатной сетки. Ширину окна под разделительную диффузию принято брать равной толщине эпитаксиальной пленки.

На данном этапе рассматривается ряд вариантов топологии, отличающейся компоновкой отдельных узлов. В процессе разработки вариантов топологии происходит перемещение элементов, изменение их формы, в частности, многократный изгиб каналов резисторов, изменение формы, коллекторных контактов, формы транзисторов и другие модификации. При этом необходимо осуществлять корректировку геометрических размеров элементов для сохранения значений их электрических параметров. На свободных периферийных участках кристалла располагаются метки совмещения, тестовые элементы и другие вспомогательные элементы. В заключение выбирают оптимальный предварительный вариант топологии.

Выбор окончательного варианта топологии и его оптимизация. Цель этого этапа — вскрыть неиспользованные резервы и оценить качество топологии. Если после уплотнения всех элементов на кристалле осталась незанятая площадь, то можно либо уменьшить площадь кристалла, либо внести в топологию изменения,

снижающие требования к технологии изготовления микросхемы: увеличить расстояние между контактными площадками; ширину межэлементных соединений и расстояние между ними; спрямить шины металлизации, границы изолирующих областей.

Заключительной стадией являются контрольно-проверочные расчеты топологии микросхемы, включающие выявление топологических ошибок (правильность коммутации элементов, оценку теплового режима, паразитных элементов и связей). Исходя из окончательного варианта топологии выполняют послойные чертежи для изготовления фотошаблонов.

Спроектированная топология должна: удовлетворять всем предъявляемым электрическим, конструктивным и технологическим требованиям и ограничениям; обеспечивать возможность экспериментальной проверки электрических параметров элементов или отдельных блоков схемы; давать возможность сокращения числа технологических операций и стоимости изготовления (простые методы изоляции элементов; однослойная металлизация и др.); плотность размещения элементов должна быть по возможности максимальной.

Далее проводят оценку надежности и анализ конструкции полупроводниковой микросхемы. При положительных оценках конструкции переходят к разработке документации на микросхему.

В отличие от биполярных микросхем главная особенность микросхем на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности заключается в отсутствии изолирующих областей. Это связано с тем, что в схемах на транзисторах с каналами одного типа электропроводности потенциал подложки у последних одинаков. У n -канальных транзисторов он равен минимальному потенциалу в схеме, а у p -канальных — максимальному. Обычно этим потенциалом является потенциал «земли». МДП-микросхемы могут изготавливаться на объемных пластинах, а не на эпитаксиальных (как биполярные микросхемы). Обычно кристаллы МДП-микросхем крепятся на металлическое основание корпуса с помощью эвтектического сплава, образуя омический контакт, на котором поддерживается потенциал «земли». Поэтому для изготовления МДП-транзистора требуется лишь один процесс диффузии. Это приводит к большей плотности компоновки в МДП-микросхемах, чем в биполярных микросхемах.

Указанных достоинств лишены микросхемы на комплементарных МДП-транзисторах (КМДП). У них требуется создавать на подложке диффузионные области с типом электропроводности, противоположным типу электропроводности основной подложки. Это приводит к тому, что плотность компоновки КМДП-микросхем близка к плотности компоновки биполярных микросхем.

Для практической разработки топологии биполярных микро-

схем достаточно сведений данного параграфа и формул и примеров гл. 12, 13.

В МДП-микросхемах более активно проявляется связь топологии МДП-транзисторов с их электрическими характеристиками. Поэтому в § 15.2, 15.3 основное внимание будет уделено практической разработке топологии МДП-микросхем.

15.2. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ НА МДП-ТРАНЗИСТОРАХ

Основой построения цифровых микросхем на МДП-транзисторах являются инверторы. Поэтому анализ характеристик последних и разработка их топологии носят общий характер.

Инвертор на транзисторах с каналами одного типа электропроводности (будем рассматривать *n*-канальные МДП-транзисторы). Обычно в инверторах в качестве нагрузочного резистора не используется МДП-транзистор. На рис. 15.1,а представлена электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности: VT_n — нагрузочный транзистор, выполняющий функции резистора, VT_a — активный транзистор. В инверторах обычно $E_3 = -E_c$ либо $E_3 - U_{3H\text{ пор}} > E_c$ (см. § 14.2). При $E_3 = E_c$ максимальное выходное напряжение равно $E_c - U_{3H\text{ пор}}$, так как VT_a — закрыт, а VT_n — всегда работает на

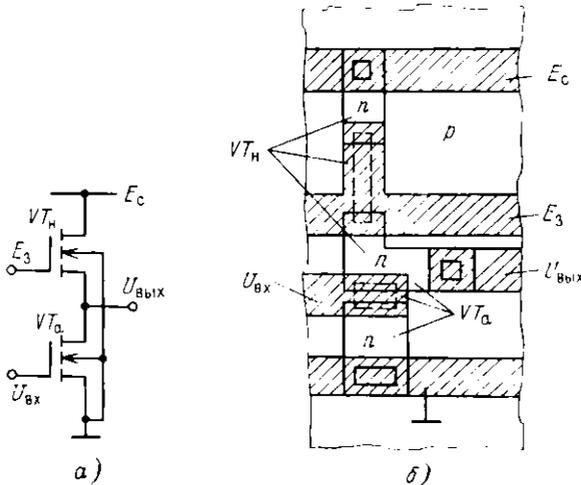


Рис. 15.1. Электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности (а) и его топология (б)

пологом участке характеристики и через него течет обратный ток транзистора VT_a . При $E_3 - U_{\text{ЗИ пор}} > E_c$ транзистор VT_n работает в крутой области ВАХ и максимальное выходное напряжение равно E_c . Обеспечение малого выходного напряжения, соответствующего логическому 0 (на входе высокое напряжение, соответствующее логической 1), требует, чтобы в открытом состоянии сопротивление VT_n было существенно больше сопротивления VT_a , т. е. $b_n \gg b_p$.

Если $E_3 = E_c$ (транзистор VT_n работает на пологом участке ВАХ), передаточную характеристику инвертора разобьем на две области:

$$U_{\text{вых}} \geq U_{\text{вх}} - U_{\text{ЗИ пор}} \text{ и } U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}} - U_{\text{ЗИ пор}}.$$

В первой области оба транзистора работают на пологом участке ВАХ. Используя соотношение (14.17), с учетом равенства токов транзисторов VT_n и VT_a получим:

$$b_n (U_{\text{вх}} - U_{\text{ЗИ пор}})^2 \cdot 2 = b_p (E_c - U_{\text{вых}} - U_{\text{ЗИ пор}})^2 \cdot 2. \quad (15.1a)$$

Обозначив

$$b_n/b_p = z_n L_n/(z_p L_p) = m \quad (15.1б)$$

и введя нормированные значения

$$U_{\text{вых}}/(E_c - U_{\text{ЗИ пор}}) = B'_{\text{вых}} \text{ и } (U_{\text{вх}} - U_{\text{ЗИ пор}})/(E_c - U_{\text{ЗИ пор}}) = B'_{\text{вх}},$$

представим (15.1a) в виде

$$B'_{\text{вых}} = 1 - B'_{\text{вх}} + \bar{m}. \quad (15.1в)$$

Во второй области на пологом участке ВАХ работает только транзистор VT_n . Используя (14.14), (14.17) и учитывая равенство токов,

$$b_n [(U_{\text{вх}} - U_{\text{ЗИ пор}}) U_{\text{вых}} - U_{\text{вых}}^2] = b_p (E_c - U_{\text{вых}} - U_{\text{ЗИ пор}})^2 \cdot 2. \quad (15.2a)$$

Вводя $B'_{\text{вых}}$ и $B'_{\text{вх}}$, получим

$$B'_{\text{вых}} = \left| 1 + m B'_{\text{вх}} - \sqrt{(1 + m B'_{\text{вх}})^2 - 1 - m} \right| \cdot (1 + m). \quad (15.2б)$$

На рис. 15.2 представлены кривые, соответствующие соотношениям (15.1в) и (15.2б). Из рисунка видно, что для уменьшения выходного напряжения необходимо увеличивать m . При заданном значении $B'_{\text{вх}}$ требуемое значение $B'_{\text{вых}}$, соответствующее логическому 0 ($B'_{\text{вых}} = \text{минимально}$), обеспечивается выбором m . Обычно $m = 10 \dots 40$. Вариант, когда $E_3 = E_c$ имеет наибольшее распространение.

Если же $E_3 - U_{3И\text{пор}} > E_c$ (при этом VT_H всегда работает в крутой области ВАХ), то можно получить выражения, аналогичные (15.1) и (15.2).

При $U_{\text{вых}} \geq U_{\text{вх}} - U_{3И\text{пор}}$

$$(1 - B''_{\text{вых}}) (1 - \kappa B''_{\text{вх}}) = m \kappa B''_{\text{вх}}; \quad (15.3a)$$

при $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}} - U_{3И\text{пор}}$

$$(1 - B''_{\text{вых}}) (1 - \kappa B''_{\text{вх}}) = m \kappa [B''_{\text{вх}} (2 B''_{\text{вх}} - B''_{\text{вых}})]; \quad (15.3b)$$

где $B''_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}/E_c$; $B''_{\text{вх}} = (U_{\text{вх}} - U_{3И\text{пор}})/E_c$; $\kappa = E_c/[2(E_c - U_{3И\text{пор}}) - E_c]$.

Основными параметрами инвертора являются потребляемая мощность и быстродействие. Рассмотрим наиболее часто встречающийся случай $E_3 = E_c$. Инвертор потребляет мощность, когда на выходе низкий потенциал. Считая, что $U_{\text{вых}} \approx 0$ и VT_H — на пологом участке [см. (14.7)], имеем

$$P = b_H E_c (E_c - U_{3И\text{пор}})^2 2. \quad (15.4a)$$

Для получения средней мощности выражение (15.4a) разделим на 2:

$$\bar{P} = b_H E_c (E_c - U_{3И\text{пор}})^2 4. \quad (15.4b)$$

Быстродействие инвертора обусловлено, в основном, временем перезаряда суммарной емкости C_c , подключенной к стоку активного или истоку нагрузочного транзистора (рис. 15.1,а). Величина C_c

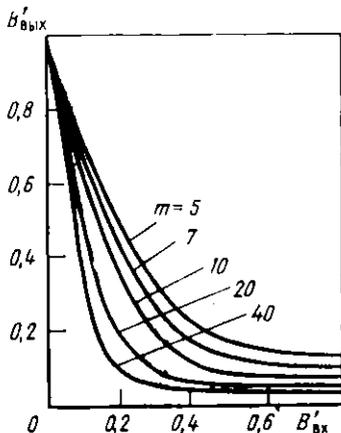


Рис. 15.2. Нормированные передаточные характеристики инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности

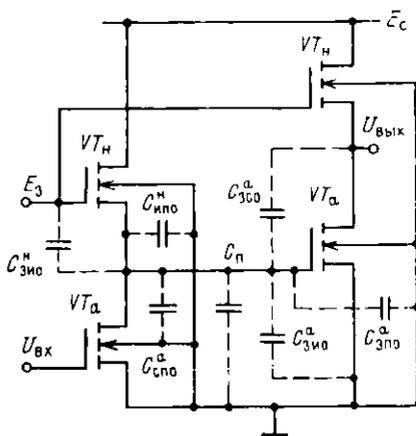


Рис. 15.3. Электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности, нагруженного на аналогичный инвертор

определяется из рис. 15.3 в предположении, что инвертор нагружен на аналогичный инвертор. Из рисунка следует, что

$$C_c = C_{зп0}^н + C_{нп0}^н + C_{сп0}^а + C_{п0} + C_{зп0}^а + C_{зп0}^а + \xi C_{зс0}^а, \quad (15.5)$$

где $C_{зп0}^н$, $C_{нп0}^н$ — емкости затвор — исток, исток — подложка нагрузочного транзистора; $C_{сп0}^а$, $C_{зп0}^а$, $C_{зп0}^а$, $C_{зс0}^а$ — емкости сток — подложка, затвор — исток, затвор — подложка, затвор — сток активного транзистора; $C_{п0}$ — паразитная емкость монтажных соединений; $\xi = \sqrt{m+1}$ — коэффициент, связанный с эффектом Миллера и имеющий порядок единиц. Емкости $C_{нп0}^н$, $C_{сп0}^а$ — барьерные емкости переходов; $C_{зп0}^а$ — МДП-емкость; $C_{зп0}^н$, $C_{зп0}^а$, $C_{зс0}^а$ — МДП-емкости, возникающие из-за перекрытия тонким подзатворным окислом и электродом затвора областей истока и стока.

Быстродействие инвертора из-за различной геометрии транзисторов ($b_a \gg b_n$) определяется длительностью перезаряда емкости C_c при изменении транзистором T_n напряжения $U_{вых}$ от 0 до $E_c - U_{зи\text{ пор}}$. Тогда длительность фронта или задержку переключения запишем как

$$t_{зд}^{0,1} \approx 2 C_c U_{зи\text{ пор}} / [b_n (E_c - 2 U_{зи\text{ пор}}) (E_c - U_{зи\text{ пор}})].$$

Эта задержка определяется временем изменения выходного напряжения от логического 0 до $U_{зи\text{ пор}}$, а задержка $t_{зд}^{1,0}$ — временем изменения выходного напряжения от логической 1 до $U_{зи\text{ пор}}$. Значения $t_{зд}^{0,1} \gg t_{зд}^{1,0}$ и

$$t_{зд} = 0,5 (t_{зд}^{0,1} + t_{зд}^{1,0}) \approx C_c U_{зи\text{ пор}} [b_n (E_c - 2 U_{зи\text{ пор}}) \times (E_c - U_{зи\text{ пор}})]. \quad (15.6)$$

Работа переключения

$$\bar{P} t_{зд} \approx E_c (E_c - U_{зи\text{ пор}}) C_c U_{зи\text{ пор}} [4 (E_c - 2 U_{зи\text{ пор}})]. \quad (15.7)$$

Как видно из (15.7), для уменьшения $\bar{P} t_{зд}$ необходимо уменьшить емкость C_c и напряжение питания (что эквивалентно уменьшению порогового напряжения), т. е. уменьшить геометрические размеры транзистора и, что немаловажно, емкость $C_{зс0}$, которая увеличена в ξ раз. Для уменьшения $C_{зс0}$ целесообразно использовать МДП-транзисторы с самосовмещенным затвором.

Минимальные геометрические размеры инвертора существенно зависят от минимально возможных значений z_{min} и L_{min} . Величина L_{min} ограничена расширением слоя пространственного заряда в области канала:

$$L_{\text{min}} \geq \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_n |U_{сп} - U_{сп\text{ пвс}}| / q N}. \quad (15.8a)$$

Для инвертора при максимальной ширине слоя пространственного заряда

$$L_{\min} \geq \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_n |U_{3H \text{ пор}}| / q N}. \quad (15.86)$$

Значение L_{\min} , как видно из (15.86), зависит от концентрации примесей в полупроводниковой пластине N и порогового напряжения $U_{3H \text{ пор}}$. Минимальная длина канала по фотошаблону $L_{\min \phi} = L_{\min} + 2h$, где h — глубина залегания истокового и стокового переходов; $L_{\min} \geq 3 \dots 5$ мкм.

Значение z_{\min} зависит от допустимого разброса минимального значения $U_{\text{вых}}$. Из соотношения (15.2б) при $B'_{\text{вых}} \ll 1$ имеем

$$B'_{\text{вых}} = [2(1 + m B'_{\text{вх}})]^{-1}. \quad (15.9)$$

С учетом возможной погрешности Δm , считая, что $z_n \ll L_n$, $z_a \gg L_a$, из (15.1б) получаем

$$\Delta m / m \approx \Delta z_n / z_n + \Delta L_a / L_a. \quad (15.10)$$

Как следует из (15.9),

$$\Delta B'_{\text{вых}} / B'_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}} = -\Delta m / m (1 + m B'_{\text{вх}}). \quad (15.11a)$$

Пологая $m B'_{\text{вх}} \gg 1$ ($B'_{\text{вх}} \ll 1$), с учетом (15.10) получаем в наилучшем случае

$$|\Delta U_{\text{вых}}| / U_{\text{вых}} = |\Delta m| / m \approx |\Delta z_n| / z_n + |\Delta L_a| / L_a. \quad (15.11б)$$

Из (15.11б) имеем

$$z_n = |\Delta z_n| (|\Delta U_{\text{вых}}| / U_{\text{вых}} - |\Delta L_a| / L_a). \quad (15.12)$$

Выражение (15.12) можно получить и из (15.3б) при $E_a = U_{3H \text{ пор}} > E_c$. При заданных величинах $|\Delta U_{\text{вых}}| / U_{\text{вых}}$, L_a / L_n , Δz_n и L_a находится $z_{n \text{ мин}}$. Соотношения (14.2), (14.15), (15.1б), (15.4), (15.12) позволяют определить геометрические размеры инвертора.

На рис. 15.1,б приведена топология инвертора на транзисторах с каналами одного типа электропроводности при $E_a \neq E_c$. Непрерывными линиями показаны границы диффузионных областей истока и стока; штриховыми — границы тонкого оксида. При $E_a = E_c$ соответствующие шины объединяются. Как видно из рисунка, сток VT_a и сток VT_n объединены в одну область. Потенциал полупроводниковой пластины устанавливается равным потенциалу «земли», созданием омического контакта с основаньем корпуса и соответствующим соединением электрода последнего с областью истока транзистора VT_a .

Пример. Разработать топологию инвертора при $E_a = E_c$ на МДП-транзисторах с n -каналом, нагруженного на аналогичный инвертор. Пусть $E_a = E_c = 7.5$ В; $U_{3H \text{ пор}} = 2.5$ В; $\Delta U_{\text{вых мин}} = 0.25$ В; $|\Delta U_{\text{вых мин}}| / U_{\text{вых мин}} = 0.5$; $P = 0.25$ мВт; отклонение линейных размеров от номинала ± 0.4 мкм; $L_a / L_n = 3$ мкм; минимальная ширина металлизированной дорожки и расстояние

между дорожками 10 мкм; минимальный размер контактного окна к областям истока и стока 4×4 мкм²; расстояние между границей контактного окна и границей окна под диффузию 4 мкм, глубина залегания p - n переходов $h=2$ мкм, значение перекрытия тонким окислом областей стока и стока 2 мкм, удельная барьерная емкость переходов $C_n=150$ пФ/мм², диэлектрика $C_{од}=345$ пФ/мм², $\mu_n=800$ см²/(В·с).

Из соотношения (14.46) получим

$$b_n = 4\bar{P} [E_c (E_c - U_{\text{ЗИ пор}})] \approx 0,005 \text{ мА/В}^2.$$

При $U_{\text{вх}} = E_c - U_{\text{ЗИ пор}} = 5$ В. Значение $B'_{\text{вх}} = 0,5$. На рис. 15.2 для обеспечения $U_{\text{вых}} = 0,25$ В [$B'_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / (E_c - U_{\text{ЗИ пор}}) = 0,05$] $m=20$. Для определения m можно было воспользоваться соотношением (15.9); $b_n = mb_n' = 0,1$ мА/В². Примем $L_n = L_{n \text{ мин}} = 3$ мкм. Тогда из (14.2) и (14.15) $z_n / L_n = b_n / (\mu_n C_{од}) \approx 3,6$ и $z_n = 11$ мкм. С помощью (15.12) при $|Az_n| = |M_n| = 0,8$ мкм, $z_n = 4$ мкм, $L_n = z_n m / (z_n' / L_n) = 22$ мкм, $\xi = |m+1| = 5,5$.

Руководствуясь технологическими ограничениями, сформулированными выше, и топологией инвертора, показанной на рис. 15.1,б, получим площади: $A_n^{\text{вх}} = 6,1 \cdot 10^{-4}$ мм²; $A_n^{\text{с}} = 5,9 \cdot 10^{-4}$ мм²; площади канала затвора $A_n^{\text{дв}} = 0,33 \times 10^{-4}$ мм², $A_n^{\text{дв}} = 0,88 \cdot 10^{-4}$ мм²; площади перекрытия подзатворным окислом областей истока и стока $A_n^{\text{дв}} = A_n^{\text{дв}} = 0,22 \cdot 10^{-4}$ мм², $A_n^{\text{дв}} = A_n^{\text{с}} = 0,08 \times 10^{-4}$ мм²; площадь общей области транзисторов $A_n^{\text{с}} = A_n^{\text{вх}} = 8,0 \cdot 10^{-4}$ мм². Длина металлической шины, соединяющей выход инвертора со входом нагрузочного инвертора, $l_m = 0,08$ мм.

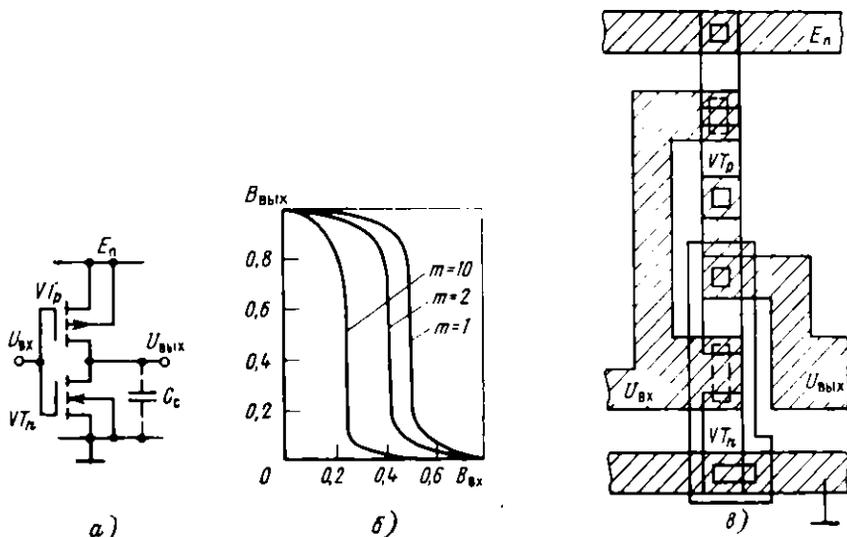


Рис. 15.4. Электрическая схема инвертора на комплементарных МДП-транзисторах (а), его нормированная передаточная характеристика (б) и топология (в)

Используя площади получим: емкости областей истока и стока $C_{a_{и.о}} = 0,091$ пФ, $C_{c_{и.о}} = 0,088$ пФ; емкости затвора $C_{a_{з.п.о}} = 0,011$ пФ, $C_{c_{з.п.о}} = 0,030$ пФ; емкости затвор — исток, затвор — сток $C_{a_{з.п.о}} = C_{c_{з.п.о}} = 0,008$ пФ, $C_{a_{и.о}} = C_{c_{и.о}} = 0,003$ пФ; емкость общей области транзисторов $C_{a_{с.п.о}} = C_{c_{с.п.о}} = 0,12$ пФ. Емкость соединительной шины $C_{с.п.о} = 0,055$ пФ (см. пример § 14.3). Используя (15.5) и $\xi = 5,5$, имеем $C_{с.п.о} = 0,36$ пФ. Воспользовавшись (15.6), получим $t_{зд} = 15$ нс. При расчете геометрических размеров транзисторов инвертора для нахождения b_n можно было исходить из заданного $t_{зд}$.

Инвертор на комплементарных транзисторах. На рис. 15.4,а показана схема инвертора на комплементарных МДП-транзисторах (КМДП). Транзистор VT_n имеет канал n -типа, а VT_p — канал p -типа. Предполагается, что у транзисторов индуцированные каналы. Как видно из рисунка, максимальное значение $U_{вых}$ близко к E_n , а минимальное — к нулю. Будем полагать, что абсолютные значения пороговых напряжений одинаковы и равны $U_{зи\ пор}$, а $E_n \geq 2U_{зи\ пор}$.

Для получения передаточной характеристики инвертора разобьем ее на три области:

$$\begin{aligned} U_{вых} > U_{вх} + U_{зи\ пор}; \quad U_{вх} - U_{зи\ пор} \leq U_{вых} \leq U_{вх} + U_{зи\ пор}; \\ U_{вых} < U_{вх} - U_{зи\ пор}. \end{aligned} \quad (15.13)$$

Области, где $U_{вх} < U_{зи\ пор}$ (VT_n закрыт) и $U_{вх} > E_n - U_{зи\ пор}$ (VT_p закрыт), не рассматриваются.

В первой области VT_n работает на пологом участке ВАХ, а VT_p на крутом. Используя (14.14), (14.17) и учитывая равенство токов транзисторов VT_p и VT_n , получаем

$$\begin{aligned} (U_{вх} - E_n + U_{зи\ пор})(U_{вых} - E_n) - (U_{вых} - E_n)^2/2 = \\ = m(U_{вх} - U_{зи\ пор})^2/2, \end{aligned} \quad (15.14а)$$

где $m = b_n/b_p$. Введем нормированные значения

$$B_{вых} = U_{вых}/E_n, \quad B_{вх} = (U_{вх} - U_{зи\ пор})/(E_n - 2U_{зи\ пор})$$

и обозначив $2U_{зи\ пор}/E_n = \kappa$, представим (15.14,а) в виде

$$(1 - \kappa)(B_{вх} - 1)(B_{вых} - 1) - (B_{вых} - 1)^2/2 = m(1 - \kappa)^2 B_{вх}^2/2 \quad (15.14б)$$

или

$$B_{вых} = 1 + (1 - \kappa) [B_{вх} - 1 + \sqrt{(1 - B_{вх})^2 - m B_{вх}^2}]. \quad (15.14в)$$

Во второй области оба транзистора работают на пологом участке ВАХ. Используя (14.17) и учитывая равенство токов, имеем

$$(U_{вых} - E_n + U_{зи\ пор})^2/2 = m(U_{вх} - U_{зи\ пор})^2/2 \quad (15.15а)$$

или

$$B_{вх} = (1 + \sqrt{m})^{-1}. \quad (15.15б)$$

Из (15.15б) видно, что во второй области выходное напряжение меняется скачком. В третьей области транзистор VT_p работает на пологом участке ВАХ, а VT_n на крутом. Используя (14.14) и (14.17), получим

$$(U_{вх} - E_n + U_{зи\text{пор}})^2/2 = m [(U_{вх} - U_{зи\text{пор}}) U_{вых} - U_{вых}^2/2], \quad (15.16a)$$

$$(1 - \kappa)^2 (1 - B_{вх})^2 = m [2(1 - \kappa) B_{вх} B_{вых} - B_{вых}^2] \quad (15.16б)$$

или

$$B_{вых} = (1 - \kappa) [B_{вх} - \sqrt{B_{вх}^2 - (1 - \kappa)^2/m}]. \quad (15.16в)$$

Из анализа соотношений (15.13) -- (15.16) следует, что (15.14) справедливо при

$$B_{вх} < (1 + \sqrt{m})^{-1}, \quad (15.17a)$$

(15.16) -- при

$$B_{вых} > (1 + \sqrt{m})^{-1}, \quad (15.17б)$$

а при $B_{вх} = (1 + \sqrt{m})^{-1}$ из (15.14в) и (15.16в) имеем соответственно

$$B_{вых} = (1 + \kappa + \sqrt{m}) / (1 + \sqrt{m}) \quad (15.18a)$$

и

$$B_{вых} = (1 - \kappa) (1 + \sqrt{m}). \quad (15.18б)$$

Пример: Рассчитать нормированные передаточные характеристики инвертора на КМДП-транзисторах при $\kappa = 0,5$ и $m = 1; 2; 10$.

Используя выражения (15.14в), (15.16а) и (15.17), (15.18), получим передаточные характеристики, показанные на рис. 15.4,б. При $m = 0,5$ и 0,1 передаточные характеристики получаются из характеристик, показанных на рисунке.

В статическом режиме инвертор на КМДП-транзисторах потребляет мощность $P \approx 0$. В динамическом режиме

$$P \approx 2 E_n^2 C_c f + E_n I_0 + 2 E_n I_{скв} t_{\phi} f \quad (15.19)$$

где C_c — суммарная емкость; I_0 — ток утечки; $I_{скв}$ — сквозной ток, появляющийся, когда открыты оба транзистора; t_{ϕ} — длительность фронта входного импульса. В выражении (15.19) определяющую роль играет первый член. Суммарная емкость C_c определяется аналогично (15.5):

$$C_c = C_{сн0}^p + C_{з.п0}^p + C_{з.п0}^n + \kappa C_{з.с0}^p + C_{п} + C_{сн0}^n + C_{з.п0}^n + C_{з.п0}^n + \\ + \kappa C_{з.с0}^n, \quad (15.20)$$

где $\kappa \approx 2$.

Отличие связано с иным включением транзистора VT_p (см. рис. 15.1,а и рис. 15.4,а).

Задержка переключения ($t_{зд}$) практически полностью определяется временем перезаряда емкости C_c . Для обеспечения равных времен переключения инвертора (при закрытом или открытом транзисторе VT_p) значения b_n для n -канального и b_p для p -канального транзисторов целесообразно делать одинаковыми. Поскольку $\mu_n > \mu_p$, для обеспечения $b_n = b_p = b$ необходимо, чтобы

$$\mu_n \mu_p = z_p L_n (z_n L_p). \quad (15.21)$$

Целесообразно также выбирать конфигурации истоковых и стоковых областей такими, чтобы обеспечивались одинаковые значения C_c в обоих состояниях инвертора. Используя рис. 15.4,а и полагая, что время задержки определяется по уровню порога переключения $U_n \approx E_n/2$:

$$t_{зд} \approx \frac{C_c}{b(E_n - U_{зи пор})} \left[\frac{2(U_{зи пор} - 0,1 E_n)}{E_n - U_{зи пор}} + \right. \\ \left. + \ln \frac{0,95 E_n - U_{зи пор}}{0,05 U_{зи пор}} \right]. \quad (15.22)$$

При выводе (15.22) полагалось, что $U_{зи пор} \geq 0,1 E_n$. Если транзисторы имеют сильно различающиеся значения b_n и b_p , то $t_{зд}$ определяется транзистором с минимальной удельной крутизной, а средняя задержка $\bar{t}_{зд} = t_{зд}/2$.

Считая, что $E_n = 2U_{зи пор}$, рабочая частота $f \approx 1/(4\bar{t}_{зд})$, и учитывая только первый член (15.19), работу переключения можно записать в виде:

$$P \bar{t}_{зд} \approx E_n^2 C_c 2 - 2U_{зи пор}^2 C_c. \quad (15.23)$$

Из соотношений (15.19), (15.22) и (15.23) видно, что для улучшения электрических характеристик инвертора на КМДП-транзисторах так же, как и на МДП-транзисторах с каналами одного типа электропроводности, необходимо увеличивать значение b , уменьшать C_c и $U_{зи пор}$. Желательно обеспечение $|U_{зи пор}| = 0,5 \dots 1,0$ В. Малая потребляемая мощность КМДП-инвертора сохраняется на частотах $f \leq 1$ МГц. При больших частотах потребляемая мощность существенно возрастает.

На рис. 15.4,б показана топология инвертора на КМДП-транзисторах. На рисунке шлошными линиями показаны границы диффузионных областей, штриховыми — границы тонкого подзатворного оксида. Инвертор изготовлен на кремнии n -типа. Для формирования транзистора с n -каналом в пластине создаются слаболегированные диффузионные области p -типа. Электроды стока и истока p -канальных транзисторов формируются на основе

сильнолегированных областей p^+ -типа. Шина земли объединяет диффузионную область p -типа с истоком транзистора VT_n . Подложка имеет потенциал, равный потенциалу истока транзистора VT_p . При определении геометрических размеров каналов транзисторов можно брать минимально возможными ширину каналов и длину канала транзистора VT_p . Длина канала транзистора VT_n находится из уравнения (15.21). Можно задаваться минимальными длинами каналов, а выполнение условия (15.21) обеспечить соответствующими значениями ширины каналов.

В отличие от инвертора рис. 15.1,б в инверторе на КМДП-транзисторах использована добавочная диффузионная область (p -типа), а области стока транзистора VT_n и истока транзистора VT_p изготавливаются отдельно. Это приводит к большей площади, занимаемой КМДП-инвертором, несмотря на то, что все n -канальные транзисторы могут объединяться в одной диффузионной области.

При формировании n -канального транзистора на поверхности p -областей в некоторых случаях возникает инверсионный слой. Для его нейтрализации используется охранное n^+ -кольцо, окружающее транзистор T_n и помещенное в p -область. При этом подзатворный окисел и электрод затвора должны полностью перекрывать пространство внутри охранного кольца и его внутреннюю часть.

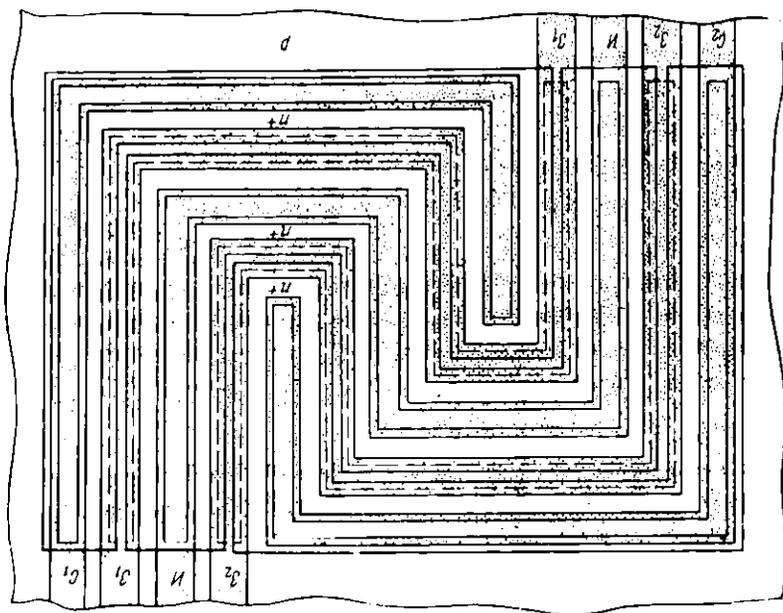
15.3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ КАСКАДОМ НА ВХОДЕ

Разработка топологии аналоговых микросхем имеет определенную специфику по сравнению с разработкой топологии цифровых микросхем. Это связано с чувствительностью аналоговых микросхем к разбросу параметров элементов, к их температурному и временному дрейфу, а также к шумам и наводкам. Сказанное, в первую очередь, относится к аналоговым микросхемам с дифференциальным каскадом на входе. В таких микросхемах выходной каскад обычно мощный. Он является сосредоточенным источником выделения тепла, что может привести к значительному температурному градиенту на полупроводниковой пластине. Поэтому необходимо принимать меры для минимизации влияния неравномерного распределения температуры. В связи с этим элементы, которые должны иметь идентичные характеристики (элементы дифференциального каскада), следует делать не только одинаковыми геометрическими размерами, но и одинаково ориентировать и

плоскости кристалла и располагать на одних изотермических контурах, чаще всего на равных расстояниях от источника выделения тепла. Как правило, мощные выходные каскады располагаются по краю полупроводникового кристалла и их локальный нагрев приводит к образованию изотермических контуров, приблизительно параллельных краям транзисторов (транзистора) выходного каскада. Если в дифференциальном каскаде имеются резисторы, номиналы которых должны находиться в определенном соотношении, то приведенные выше рекомендации относятся и к ним. Кроме того, целесообразно, чтобы они имели одинаковую ширину.

Повышенная симметрия диффузионного каскада на МДП-транзисторах может быть достигнута во «вложенной» структуре, показанной на рис. 15.5, использование которой позволяет объединить истоковые области (I). Области затворов (Z_1, Z_2) и стоков (C_1, C_2) выполняются раздельно. Одинаковая форма стоковых и затворных областей и их близкое расположение друг к другу позволяют получить идентичные характеристики обоих транзисторов.

В линейных микросхемах возникает паразитная связь между выходом и входом по полупроводниковой подложке. Для миними-



ис. 15.5. Топология МДП-транзисторов дифференциального каскада с «вложенной» структурой

зации паразитной связи при разработке топологии микросхемы целесообразно предусмотреть два контакта к подложке: один — вблизи входного, другой — вблизи выходного каскада.

15.4. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ИНЖЕКЦИОННАЯ ЛОГИКА

На рис. 15.6,а показана структура И²Л-ветвиля. Как видно, он состоит из горизонтального транзистора *p-n-p* типа с эмиттерной областью, называемой инжектором, и *n-p-n* транзистора, работающего в инверсном режиме (см. § 12.3). Инверсный режим работы является нормальным для схем И²Л, поэтому в дальнейшем термин «инверсный» не будет использоваться. Транзистор *p-n-p* типа является генератором тока для питания базовой цепи *n-p-n* транзистора (рис. 15.6,а) и обычно он заменяется генератором тока I^* , показанным на рис. 15.6,в.

На рис. 15.7,а, б в качестве примера представлены соответственно электрическая схема и эскиз топологии полусумматора. Штриховыми линиями обозначены входные и выходные цепи. Как видно из рисунков, для обеспечения работоспособности И²Л-ветвей необходимо обеспечить одинаковые токи I^* в базовых цепях *n-p-n* транзисторов. Это достигается одинаковыми площадями боковых частей эмиттерных *p-n* переходов, находящихся в непосредственной близости от инжектора — эмиттера *p-n-p* транзистора (см. § 12.4). Кроме того, для возможности насыщения *n-p-n* транзисторов необходимо, чтобы их коэффициенты усиления удовлетворяли условию $h_{21К} > 1$. Последнее может быть достигнуто при рабочих токах, существенно меньше микроампера.

Широкое распространение микросхем данного типа обусловлено следующими причинами:

1. Использование необычного режима работы *n-p-n* транзисторов позволяет объединить их эмиттерные области, что осуществляется самой полупроводниковой пластиной. Это в большинстве случаев позволяет отказаться от межэлементной изоляции. Обыч-

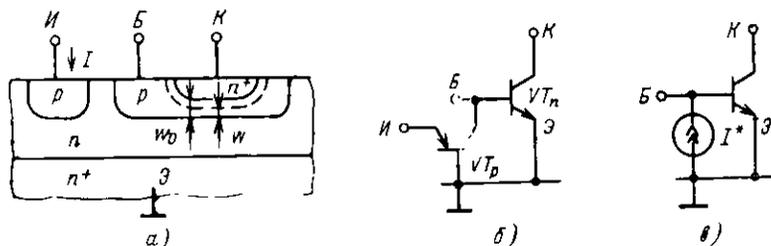


Рис. 15.6. Структура (а) и эквивалентные схемы (б, в) И²Л ветвиля

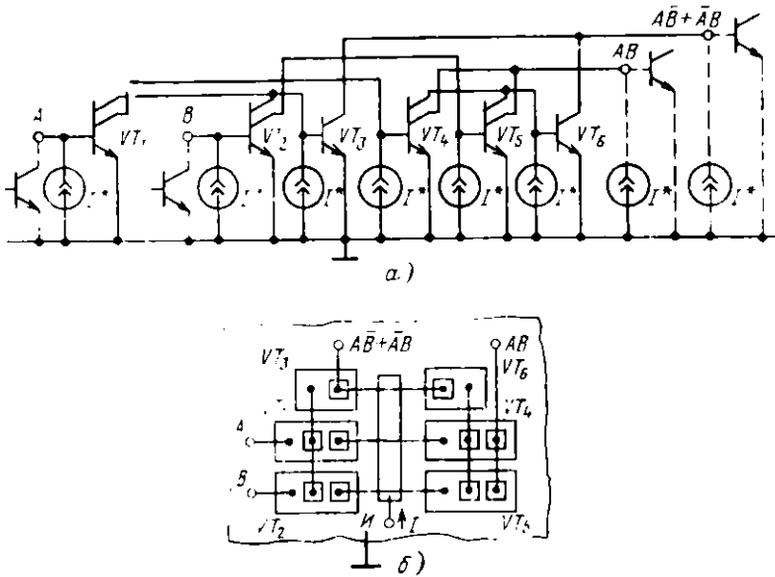


Рис. 15.7. Электрическая схема (а) и эскиз топологии (б) полусумматора на слое П-Л-вентилей

о потенциал полупроводниковой пластины поддерживается равным нулю.

2. Отказ от традиционного способа питания базовых областей $p-n$ транзисторов (через резисторы) позволяет практически полностью исключить резисторы.

3. Многоколлекторные $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторы позволяют сократить количество транзисторов, используемых для реализации данной функции.

4. Потребляемая мощность до единиц нановатт позволяет использовать структуру с минимально возможными геометрическими размерами. Рассмотренные факторы облегчают создание БИС на слое П-Л.

При определении структуры и геометрических размеров $p-n-p$ транзисторов используются данные § 12.4, а условие $h_{21к} > 1$ накладывает специфические требования на геометрию $n-p-n$ транзистора и легко реализуется на практике (см. пример § 12.3).

15.5. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

После изготовления полупроводниковых или гибридных микро-ем их поверхность защищают различными пленками SiO_2 , Si_3N_4 , O , GeO и др. Их толщина обычно не превышает 1 мкм, и они

выполняют функции технологической защиты элементов микросхем от воздействия окружающей среды. При эксплуатации не используется бескорпусная и корпусная защиты. Кроме того, корпуса обеспечивают удобство и надежность монтажа микросхем в аппаратуре.

Бескорпусные микросхемы. Бескорпусная защита наиболее проста и может быть выполнена на основе неорганических и органических полимерных материалов. Эти материалы эластичны, обладают высокими электроизоляционными свойствами ($\rho = 10^{13} \dots 10^{15}$ Ом·см, $\epsilon = 3 \dots 5$, $\text{tg} \leq 0,005 \dots 0,01$) и электрическая прочность (0,2 ... 2 кВ/см), устойчивостью при воздействии повышенных температур, не влияют на параметры микросхемы. Они хорошо адгезируют к поверхности кристалла или платы, имеют низкую влагопоглощаемость, обладают малой химической активностью. Однако эти материалы не обеспечивают должной защиты от воздействия внешней среды и могут использоваться только совместно с общей вакуумплотной герметизацией отдельного блока или устройства в целом.

Лучшие характеристики у защитных покрытий из тонких легкоплавких пленок стекол (халькогенидные, боросиликатные, свинцовоборосиликатные и др.). Они имеют высокую влагостойкость и хорошие стабилизирующие свойства. Для предотвращения химического взаимодействия стекла с материалами, нанесенными на плату или кристалл, может использоваться промежуточный буферный слой.

Корпусные микросхемы. Корпус должен быть герметичным, его внутренняя среда не должна сказываться на характеристиках и надежности работы микросхемы. Он должен также быть достаточно механически прочным, чтобы предохранять элементы и компоненты микросхемы от повреждений во время монтажа и эксплуатации, иметь удобную для печатного монтажа конструкцию по габаритам и расположению выводов. Значение паразитных элементов (индуктивность, емкость) должны быть минимальными. Конструкция корпуса должна предусматривать отвод тепла от микросхемы.

По способу герметизации корпуса делятся на герметизируемые пайкой, контактной электросваркой и холодной сваркой. По типу используемых для изготовления корпусов материалов они разделяются на металлические (со стеклянными изоляторами), металлостеклянные, стеклянные и керамические. Металлические части корпуса обычно делают из кобальта, никеля или специального сплава меди, никеля и цинка. Кристалл или плата крепятся к основанию корпуса припойным стеклом, электропроводящими материалами или специальными клеями. Организация выводов осуществ

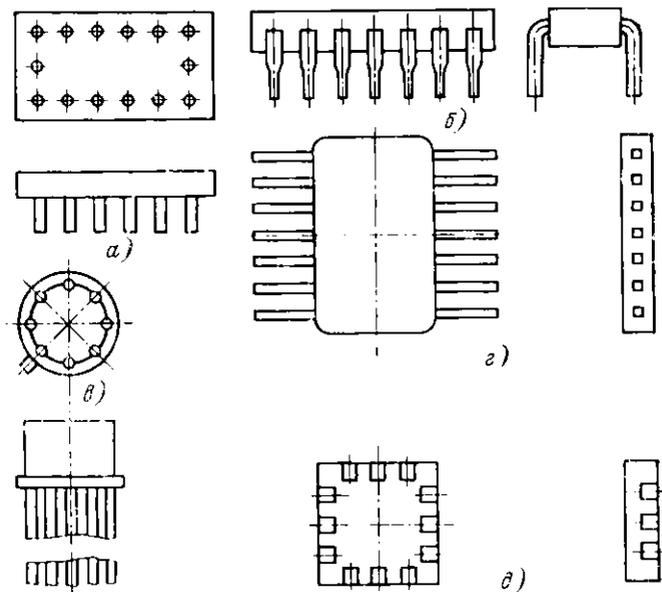


Рис. 15.8. Эскизы конструкций корпусов 1-го типа (а), 2-го типа (б), 3-го типа (в), 4-го типа (г), 5-го типа (д)

ляется с помощью соединения контактных площадок кристалла или платы с внешними выводами либо с помощью тонкой проволоки, либо за счет удлинения внутренних концов выводов корпуса и непосредственного их контактирования с существующими контактными площадками кристалла или платы.

С повышением степени интеграции микросхем увеличивается сложность изготовления корпусов, причем в ряде случаев стоимость корпуса становится выше стоимости микросхемы. В настоящее время в стране действует ГОСТ 17467—79 «Микросхемы интегральные. Основные размеры», который устанавливает требования к формам и размерам корпусов и микросхем. По этому стандарту пять типов корпусов, различающихся по размерам, форме, количеству и расположению выводов, основные характеристики которых представлены в табл. П.3. Эскизы конструкций корпусов показаны на рис. 15.8. Корпус 1-го типа (а) имеет прямоугольную форму с выводами, перпендикулярными плоскости основания корпуса и расположенными в его пределах. Этот тип корпуса удобен для линейных гибридных микросхем с точки зрения рациональной компоновки корпусов совместно с дискретными радиоэлементами. Эти элементы в основном также имеют прямоугольную конфигура-

цию. Корпуса 2-го типа (б) имеют выводы, перпендикулярные плоскости основания и выходят за его пределы. Корпуса 1-го и 2-го типов обычно выполняются в металлостеклянном и металлополимерном исполнении (пластмассовом). Пластмассовые корпуса имеют простую конструкцию и невысокую стоимость. Однако вследствие малой теплопроводности пластмассы у них мала допустимая мощность рассеяния (60 ... 100 мВт). Корпус 3-го типа (в) имеет круглую форму с выводами, перпендикулярными плоскости основания и расположенными в его пределах. Корпус 4-го типа (г) имеет прямоугольную форму и выводы, расположенные параллельно плоскости основания корпуса и выходящие за его пределы. Корпуса 5-го типа (д) — прямоугольные плоские и «безвыводные». Электрическое соединение микросхемы, размещенной в нем, осуществляется с помощью металлизированных контактных площадок, расположенных по его периметру. Обычно они изготавливаются в металлополимерном исполнении и используются для гибридных микросхем. Для полупроводниковых микросхем наиболее часто применяются корпуса 2-го, 3-го и 4-го типов. В цифровых гибридных микросхемах получили распространение корпуса 1-го, 2-го, 4-го и 5-го типов. Наряду с рассмотренными корпусами, в некоторых случаях используются нестандартные корпуса. В табл. П.3 представлены некоторые типы корпусов с размерами кристаллов или подложек для размещения в них.

15.6. ДОКУМЕНТАЦИЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Для стандартизации параметров электрических схем, их топологического и конструктивного оформления, определения требований к технологии изготовления микросхем используется комплект документации.

Технические условия. Технические условия (ТУ) на микросхему представляют собой комплекс основных требований к ней и отражают ее параметры, условия эксплуатации и хранения. Технические условия делятся на общие (ОТУ), частные (ЧТУ), временные (ВТУ). Заданные требования ко всем типам микросхем опытного или массового производства, изготавливаемых отечественной промышленностью, устанавливают ОТУ. Назначение каждого типа микросхем определяют ЧТУ. Они так же уточняют нормы на параметры и режимы испытаний, устанавливают специальные и дополнительные требования. Для определения параметров микросхем в процессе разработки выпускаются ВТУ. Выполнение требований, сформулированных в ОТУ и ЧТУ, является обязательным. Рассмотрим основные требования и ограничения, накладываемые ТУ на разработку и изготовление микросхем.

Требования к электрическим параметрам и режимам: электрические параметры микросхемы при изготовлении, хранении и эксплуатации в режимах и условиях, допускаемых в технической документации на микросхемы конкретных типов, должны соответствовать нормам, установленным в ЧТУ; в соответствии с ГОСТ предпочтительными являются следующие значения напряжений питания микросхем, В: 1,2; 2,4; 3; 4; 5; 6; 9; 12; 24; 27; 30; 48.

Требования к конструкции: микросхемы должны иметь габаритные размеры, внешний вид и массу, соответствующие нормам, установленным в технической документации; корпусные микросхемы должны быть герметичными; их выводы должны выдерживать растягивающие усилия и изгибы, легко паяться и свариваться без повреждений.

Требования к устойчивости при механических и климатических воздействиях: в процессе и после воздействия на микросхемы механических нагрузок (вибрационных, многократных ударов и центробежных), климатических воздействиях (диапазон температур, циклические изменения температуры в диапазоне, повышенная влажность и др.), оговоренных в технической документации, они должны сохранять прочность конструкции и электрические параметры в пределах, оговоренных в ЧТУ; интегральные микросхемы также должны удовлетворять требованиям к надежности, долговечности, сохраняемости и некоторым другим.

Конструкторская документация. В состав конструкторской документации (КД) входят основной комплект документов и вспомогательные комплексы документов на составные части микросхемы (корпус, инструкции по эксплуатации, паспорт и др.). Основной комплект КД состоит из функциональной и принципиальной схем, топологических сборочного и послонных чертежей, ЧТУ и др. Рассмотрим некоторые аспекты составления КД.

На принципиальной электрической схеме изображаются все элементы и компоненты и связи между ними. Элементам и компонентам присваивается буквенно-цифровое позиционное обозначение. Последовательность присвоения порядковых номеров в позиционных обозначениях элементов должна соответствовать последовательности расположения их условных графических изображений. Обычно нумерация производится сверху вниз и слева направо. Все элементы и компоненты гибридной микросхемы записываются в перечень, представленный в табл. 15.1. При заполнении табл. 15.1 следует соблюдать следующее. В графу «Обозначение» записывают номер документа, на основании которого элемент применен (стандарт, ТУ и др.). Для элементов гибридной микросхемы в графе ставится прочерк. В графе «Наименование» приводят наименование элемента или компонента, его номинал и допуск (для пассивных элементов). Для пассивных элемен-

Таблица 15.1. Пример оформления перечня элементов и компонентов

| Позиционное обозначение | Обозначение | Наименование | Количество | Примечание |
|-------------------------|-------------|--------------------------------|------------|------------|
| A1, A2 | ... ТУ | Микросхема К740УД3 | 2 | |
| C1 | ... ТУ | Конденсатор К10-9-0,15±20% | 1 | |
| C2 | — | Конденсатор 20 пФ±20%; 30 В | 1 | |
| R1, R2 | — | Резистор 1 кОм ±10%; 1 мВт | 2 | |

тов также указывают значение максимальной рассеиваемой мощности (для резисторов) и максимального рабочего напряжения (для конденсаторов). В графе «Примечание» записывают особые требования (если таковые имеются) к элементам и компонентам. Для полупроводниковых микросхем перечень элементов не составляется. Рассчитанные номиналы, допуски, а также другие данные указываются рядом с условным обозначением элемента или на поле чертежа.

Топологические чертежи носят названия «Плата» для гибридной микросхемы или «Кристалл» для полупроводниковой микросхемы. На первом листе чертежа изображается подложка со всеми слоями (сборочный чертеж), а на остальных — послойные чертежи. На поле сборочного чертежа помещают характеристические таблицы для гибридной (табл. 15.2) и полупроводниковой микросхемы (табл. 15.3). В графах табл. 15.2 используются следующие

Таблица 15.2. Пример оформления характеристической таблицы для гибридной микросхемы

| Номер слоя | Условное обозначение слоя | Наименование слоя | Материал слоя | | Электрические характеристики | Метод нанесения слоя | Номер листа чертежа |
|------------|---------------------------|------------------------------|------------------|----------|---|---------------------------------|---------------------|
| | | | Наименование | ГОСТ, ТУ | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | | Нижняя обкладка конденсатора | Алюминий | ГОСТ | Удельное сопротивление слоя 0,2 Ом/□ | Термическое испарение в вакууме | 3 |
| 2 | | Диэлектрический | Моноксид кремния | ГОСТ | Удельная емкость 5000 пФ/см ² , рабочее напряжение 60 В | То же | 4 |

щие данные: 2 — условное обозначение слоя на чертеже (различного вида штриховки); 3 — резистивный, диэлектрический, нижние обкладки конденсатора и т. д.; 4 — материал, используемый для изготовления данного слоя; 5 — обозначение материала; 6 — сопротивление слоя, удельная емкость и т. д.

В колонках табл. 15.3 используются следующие данные: 2 — разделительный слой, базовый слой, эмиттерный слой и т. д.; 3 — толщины соответствующих слоев; 4 — p , n , p^+ , n^+ и т. д.; 5, 6 — аналогично 4, 5 в табл. 15.2.

Таблица 15.3. Пример оформления характеристической таблицы для полупроводниковой микросхемы

| Номер слоя | Наименование элементов структуры | Толщина, мкм | Тип легирования проводности | Материал слоя | | Сопротивление слоя, Ом | Толщина оксидных слоев над структурой, мкм | Номер листа чертежа |
|------------|----------------------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------------|----------|------------------------|--|---------------------|
| | | | | Наименование | ГОСТ, ТУ | | | |
| 3 | Эмиттерный слой | 1,5 | n^+ | Кремний, легированный фосфором | ГОСТ | 2 | 0,4 | 4 |
| 5 | Контактные площадки и проводники | 1,5 | — | Алюминий | ГОСТ | Не более 0,05 | — | 6 |

На полях последующих чертежей помещаются таблицы с заданием размеров элементов. Вершины всех элементов, изображенных на каждом листе чертежа, нумеруются и имеют соответствующие координаты (табл. 15.4). В таблице следует разделять коор-

Таблица 15.4. Пример задания размеров элементов

| Номер вершины элемента | Координата, мм | | Номер вершины элемента | Координата, мм | |
|------------------------|----------------|-----|------------------------|----------------|----|
| | X | Y | | X | Y |
| 1 | 0,5 | 2,0 | 5 | 12 | 10 |
| 2 | 0,5 | 2,5 | 6 | 12 | 15 |
| 3 | 10 | 2,5 | 7 | 20 | 15 |
| 4 | 10 | 2,0 | 8 | 20 | 10 |

динаты, относящиеся к различным элементам. Рекомендуется производить сплошную нумерацию вершин в пределах одного листа, причем нумерацию каждого элемента следует начинать от нижней левой вершины и продолжать по часовой стрелке. Переход при нумерации от элемента к элементу осуществляется от нижнего левого угла по направлению снизу вверх и слева направо. Для БИС такие таблицы обычно не составляются (см. § 17.7).

На сборочном чертеже микросхемы показывается столько видов, разрезов, сечений, сколько необходимо для его понимания. Кроме графического изображения конструкции, на сборочном чертеже приводятся данные о сборке, способе герметизации и др. В некоторых случаях на сборочном и послойных чертежах целесообразно предусмотреть тестовые элементы или малые блоки (логические вентили, запоминающие ячейки и др.), предназначенные для контроля электрических параметров, т. е. качества технологических процессов.

Большое значение при изготовлении микросхем имеет точность совмещения фотошаблонов, в связи с этим на топологических чертежах размещаются метки совмещения.

Технологическая документация. Технологическая документация отражает методы, средства и порядок осуществления технологического процесса в целом, а также каждой его операции. Технологические документы подразделяются на основные и вспомогательные. К основным документам относятся: маршрутная карта технологического процесса, комплект операционных карт; комплект технологических инструкций. К вспомогательным: маршрутно-контрольная карта; ведомости стандартного и нестандартного оборудования, нормализованного и нестандартного инструмента; пояснительная записка.

Глава 16. КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

16.1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В тонко- и толсто пленочных гибридных микросхемах конструктивной основой, на которой располагаются элементы и компоненты, являются диэлектрические подложки, основные характеристики которых рассмотрены в § 9.2. Толщины подложек составляют 0,6; 1,0 и 1,6 мм с разбросом до 0,06 мм. В отдельных случаях используются более тонкие подложки. Их длина и ширина обычно получаются делением сторон базовой подложки размером 96×120 мм на части, кратные 2, 3 и 5 с допустимым отклонением

0,2 ... 0,3 мм. В табл. П.3 представлены размеры подложек для размещения в стандартных корпусах. Другие возможные размеры могут быть использованы для изготовления бескорпусных гибридных микросхем и микросборок. В тонкопленочных гибридных микросхемах элементы располагаются только с одной стороны подложки, а в толстопленочных могут использоваться обе ее стороны.

Один из вариантов тонкопленочной технологии — танталовая технология — уникален тем, что тантал является исходным материалом для получения и резистивных, и диэлектрических, и проводящих слоев. Однако относительно большое сопротивление слоя тантала при применении его в качестве проводника сдерживает использование полностью танталовых элементов гибридных микросхем. Основные материалы для изготовления пассивных элементов гибридных микросхем и их характеристики рассмотрены в § 9.3.

Резисторы. Тонкопленочный резистор с прямолинейной геометрией показан на рис. 16.1. Он изготовлен на диэлектрической подложке и состоит из резистивного материала шириной b и контактных площадок с перекрытием резистивного слоя d для ликвидации влияния возможного несовмещения слоев. Сопротивление пленочного резистора определяется так же, как у полупроводниковых резисторов (см. § 13.2).

$$R = R_s l, b = R_s k_{\Phi}, \quad (16.1)$$

где R_s — удельное сопротивление резистивного слоя; $k_{\Phi} = l/b$ — коэффициент формы прямолинейного резистора. В общем случае $k_{\Phi} = R/R_s$. В соотношении (16.1) не учтено влияние контактного сопротивления. Учет производится ниже.

На рис. 16.2 показаны резисторы более сложной конфигурации с $50 \geq k_{\Phi} \geq 10$, имеющие форму типа «меандр» (a) и «змейка» (b). Их сопротивление

$$R = R_s (l_{\Sigma}/b + nk_{из1; 2}) = R_s k_{\Phi}, \quad (16.2)$$

где l_{Σ} — суммарная длина прямолинейных участков резистора; n — число изломов или четвертей кольца и $k_{из1; 2}$ — эквивалентное число квадратов, определяющее сопротивление области излома (квадрата со стороной b) или четверти кольца. Для резистора на рис. 16.2, a

$$k_{из1} = 0,55, \quad (16.3a)$$

$l_{\Sigma} = 3(l+a)$ и $n=6$; на рис. 16.2, b

$$k_{из2} = 1,57 \ln(r_2/r_1), \quad (16.3b)$$

$l_{\Sigma} = 3l$ и $n=4$. На рис. 16.2, a штриховым прямоугольником показано звено (шаг) меандра. Если считать, что резистор типа «меандр» состоит из целого числа звеньев с шагом $m = a+b$ и имеет длину L ($[L = n(a+b)]$, где n — число звеньев) и ширину H , то занимаемая площадь

$$A_M = k_{\Phi} b(a+b) + L[2b(1 - k_{из1}) - a] = LH. \quad (16.4a)$$

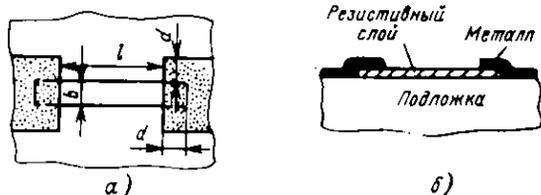


Рис. 16.1 Топология (а) и структура (б) тонкопленочного резистора с прямоугольной геометрией

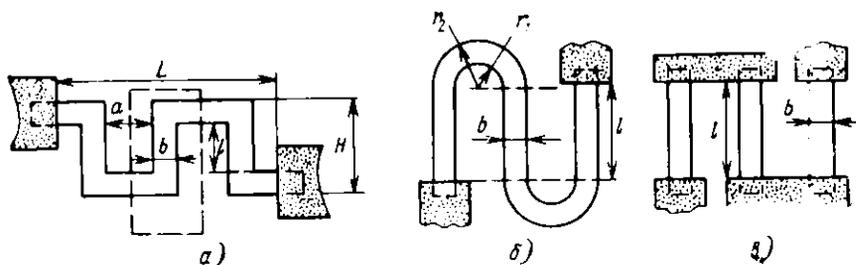


Рис. 16.2 Пленочные резисторы больших номиналов: а — меандр; б — змейка; в — полосковый

В большинстве случаев в (16.4а) можно пренебречь вторым членом. Тогда

$$A_M \approx k_{\Phi} b (a + b), \quad (16.4б)$$

т. е. при заданных k_{Φ} , b и a (часто $a=b$) площадь меандра приблизительно постоянна, не зависит от длины и ширины меандра. В резисторах типа «меандр» в местах изломов происходит большой разогрев, что в некоторых случаях необходимо учитывать. Конфигурации типа «змейки» затруднительно изготавливать с помощью координатографа, что сужает их область применения.

При изготовлении резисторов больших номиналов, особенно при методе не контактного трафарета (см § 9.4), целесообразно использовать конфигурацию, показанную на рис. 16.2,в. Если резистор рассеивает большую мощность, то его следует расщепить на несколько параллельно соединенных резистивных волосок, что увеличивает площадь теплоотдачи.

Из соображений экономии площади стараются избегать значений k_{Φ} более 50 и менее 0,1. При выборе геометрии резистора контактные площадки следует располагать с противоположных сторон (рис. 16.2). Иначе на сопротивление резистора окажет влияние смещение контактных площадок.

Расчет геометрических размеров пленочных резисторов проводится аналогично соответствующему расчету полупроводниковых резисторов (см. § 13.2). Соотношение (13.11б), хотя и применяется в большинстве случаев, определяет ориентировочное значение ширины резистора. Оно не учитывает всех конкрет-

ных условий, определяющих теплоотдачу. Остановимся на некоторых особенностях расчета геометрических размеров пленочных резисторов.

1. Следует стараться, чтобы все резисторы, расположенные в одном слое, изготавливались из одного материала и, следовательно, имели бы одинаковое R_s . Поэтому выбор оптимального материала связан с относительным уравновешиванием малых и больших номиналов. Если в одном слое имеется N резисторов, то оптимальное значение R_s найдется из уравнения

$$\frac{R_1}{R_s} + \frac{R_2}{R_s} + \dots + \frac{R_N}{R_s} = \frac{R_s}{R_1} + \frac{R_s}{R_2} + \dots + \frac{R_s}{R_N},$$

откуда

$$R_s = \left[\frac{\sum_{i=1}^N R_i / \sum_{i=1}^N (1/R_i)}{1} \right]^{1/2}. \quad (16.5)$$

Если даже при использовании удельного сопротивления слоя, полученного из (16.5), значения k_Φ выходят за заданные пределы ($0,1 \leq k_\Phi \leq 50$), то целесообразно резисторы разбить на две группы с большими и малыми сопротивлениями и для каждой из них определить с помощью (16.5) соответствующее удельное сопротивление слоя. В этом случае, разумеется, придется использовать два различных резистивных материала.

2. В соотношениях (13.10) — (13.14) следует заменить эффективную ширину на реальную (рис. 16.1, 16.2).

3. Выражение (13.13) для определения относительной погрешности изготовления резистора (точностной величины b_T при $l \gg b_T$) можно дополнить температурным коэффициентом сопротивления. Тогда результирующая погрешность проектируемого резистора

$$\Delta R/R \approx \pm 2\Delta b_T \cdot b_T \pm \Delta R_s/R_s \pm \Delta T \cdot \text{ТКС}, \quad (16.6)$$

где ΔT — рабочий диапазон температур. Учет нестабильности резистивного слоя, связанной со старением, легко учитывается в (16.6) добавлением еще одного члена, аналогичного последнему члену. Из (16.6) получим

$$b_T = \pm 2\Delta b_T (\pm \Delta R/R \pm \Delta R_s/R_s - \Delta T \cdot \text{ТКС}). \quad (16.7)$$

Данные, необходимые для расчета геометрии резистора, можно получить из табл. 9.2. Обычно $\Delta R/R = 0,05$.

При $b < l_2$ из (13.10) — (13.14) сначала рассчитывается величина b (и округляется до ближайшего большего значения, кратного шагу координатной сетки, см. § 15.1), а затем l_2 . При $b > l_2$ сначала рассчитывается длина резистора, а затем его ширина.

Точность изготовления резистора масочным методом составляет 20%. Повышение точности требует существенного увеличения ширины резистора.

Метод фотолитографии обеспечивает большую точность, чем масочный.

Пример. Рассчитать геометрические размеры резисторов с $R=250$ кОм при допустимой погрешности $\pm 15\%$; рассеиваемая мощность $P=90$ мВт; диапазон температур 20...90 °С ($\Delta T=70$ °С). Резистор изготавливается фотолитографическим методом и имеет форму меандра.

Будем исходить из следующих технологических и конструктивных ограничений (см. табл. П.2): $b_{\min} = 0,1$ мм; $\Delta b_{\tau} = \pm 0,01$ мм;

$$\Delta R_s / R_s = \pm 0,05 \quad \text{и} \quad k_{\Phi} = 50.$$

Определим резистивный материал, исходя из

$$R_s = R / k_{\Phi} = 5 \text{ кОм} / \square.$$

Из табл. 9.2 ($R_s = 5$ кОм) возьмем кермет с ТКС $\alpha = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/К $P_0 = 2$ Вт/см². Будем рассматривать наихудший случай. Тогда из (16.7) $b_{\tau} \approx 0,28$ мм. Из (13.116) имеем $b_p = \sqrt{P/(k_{\Phi} P_0)} = 0,30$ мм, а из (13.10) $b = 0,30$ мм. Примем $a = 100$ мкм (рис. 16.2,а). Из (16.46) получим $A_{\Sigma} \approx 6$ мм². Примем, что меандр — квадрат, тогда $L \approx 2,45$ мм. Длина должна быть кратна шагу меандра $m = a + b = 0,4$ мм, поэтому положим $L/m = 6$, а $L = 2,4$ мм. Из соотношений (16.4а) найдем уточненную площадь меандра $A_{\Sigma} = 6,41$ мм. При этом высота меандра $H = 1 + 2b = 2,67$ мм. Возьмем $H = 2,7$ мм.

Из анализа соотношений (13.10) — (13.14) и данных примера следует, что получить погрешность изготовления менее 10 % трудно даже при использовании метода фотоэтиграфии (требуется использовать резисторы большой ширины b). В этом случае, если необходимо обеспечить повышенную точность (порядка единиц процентов), используются подстраиваемые резисторы. Пусть требуется спроектировать резистор R_0 с точностью $\delta_0 = \Delta R_0 / R_0$. Без подстройки при выбранных технологических режимах и геометрических размерах обеспечивается точность $\delta'_0 = \Delta R'_0 / R_0$ ($|\delta'_0| > |\delta_0|$).

Принцип подстройки заключается в том, что проектируется резистор сопротивлением $R_0 + |\Delta R'_0|$, имеющий участок подстройки с сопротивлением $2\Delta R'_0$ и длиной M_n . ($M_n = 2bk_{\Phi} |\Delta R'_0| / R_0$ — участок подстройки без учета перекрывающих резистор проводников, рис. 16.3). Участок M делится на секции, получаемые последовательным делением на 2 до тех пор, пока разброс, вносимый каждой из последних двух секций, не станет меньше $|\delta_0|$. Крайняя из последних двух секций относится к основной части резистора и изготавливается без перемычки. Измеренное значение сопротивления без перерезания перемычек (участок резистора длиной M_n отключен) имеет разброс $\delta'_0 < 0$. Между количеством секций подстройки и разбросом номинала существует следующая связь:

$$|\delta_0| \geq 2 \left| \delta'_0 \right| - (2 \left| \delta'_0 \right|)^2 + 2 \left| \delta'_0 \right|^2 + \dots + 2 \left| \delta'_0 \right|^{2^n}. \quad (16.8a)$$

Преобразуя (16.8а), получим

$$|\delta_0| \geq \left| \delta'_0 \right|^{2^n - 1}. \quad (16.8б)$$

Из (16.8б)

$$n \geq 1 + \log_2 \left| \delta'_0 / \delta_0 \right|. \quad (16.9)$$

Количество секций равно ближайшему большему числу, получаемому из (16.9). При изготовлении резистора измеренное сопротивление ($R_{0из}$) лежит внутри интервала $R_0 - 2|\Delta R'_0| < R_{0из} < R_0$ и, перерезая соответствующие области перемычки, включает требуемые участки подстроечной части резистора.

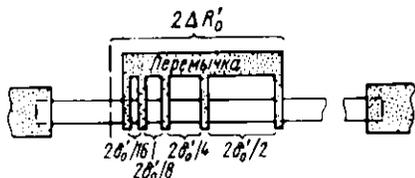


Рис. 16.3 Подстраиваемый пленочный резистор

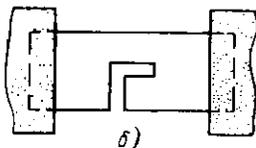
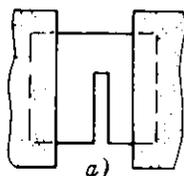


Рис. 16.4 Топология пленочных резисторов для лазерной подстройки при $k_{\phi} \leq 1$ (а) и при $k_{\phi} > 1$ (б)

Пример. Для резистора, рассмотренного в предыдущем примере: $\delta'_0 = \pm 0.15$, $b = 300$ мкм, $k_{\phi} = 50$, определить число секций и их длину для обеспечения погрешности изготовления $\delta_0 = \pm 0.03$. Рассчитаем длину области подстройки $M_n = 2bk_{\phi}|\delta'_0| \approx 4500$ мкм. Из (16.9) получим необходимое количество секций $n \geq 3.32$. Примем $n = 4$. Длину секций найдем делением M на 2; 4; 8 и 16. Округляя с точностью ± 5 мкм, получим следующие длины секций (M_i): $M_1 = 2250$ мкм; $M_2 = 1130$ мкм; $M_3 = 560$ мкм; $M_4 = 280$ мкм. При правильном определении длины секций погрешность, вносимая последней секцией (M_4), не должна превышать $|\delta_0|$:

$$\Delta I_4 (bk_{\phi}) \approx 0.02 \leq |\delta_0| \approx 0.03.$$

Для получения более высокой точности изготовления резисторов (порядка десятых долей процента) можно использовать технологию на основе тантала и подстройку с помощью лазера. Иллюстрация последнего метода показана на рис. 16.4. С помощью лазера в резистивной пленке образуются пазы, имеющие форму полосы при $k_{\phi} \leq 1$ (а) и Г-образную форму при $k_{\phi} > 1$ (б).

Рассмотренные методы могут лишь увеличивать сопротивление резистора, поэтому при такой подстройке его сопротивление следует проектировать заниженной величины.

Зависимость сопротивления резистора от частоты связана, в основном, с наличием паразитной емкости. Эта емкость определяется как собственной емкостью, так и емкостью между близко расположенными резисторами, а также между резистивным слоем и металлическим корпусом. Величина последней может быть оценена по формуле

$$C_{\text{п}} = 0.0885 \epsilon_{\text{п}} C_{\text{Г}}, \quad (16.10)$$

где $C_{\text{п}}$ — паразитная емкость, пФ/см; $\epsilon_{\text{п}}$ — относительная диэлектрическая проницаемость подложки; $C_{\text{Г}}$ — коэффициент, имеющий размерность емкости и зависящий от геометрических размеров конструкции [$C_{\text{Г}} = 2K/\sqrt{1-K^2}$, $K = \text{th}[\pi b/(4h_{\text{п}})]$ и $h_{\text{п}}$ — толщина подложки]. Собственная удельная емкость резистора составляет сотые доли, а удельная емкость участка резистивный слой — корпус может составлять до десятых долей пФ/мм². Паразитная емкость уменьшается при-

увеличении толщины подложки и уменьшении ее диэлектрической проницаемости. Указанные емкости, как и сопротивление, носят распределенный характер. Соответствующая постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса, находится из выражения (13.24), а граничная частота из формулы (12.9).

Толсто пленочные резисторы по своей конфигурации близки к тонкопленочным. Методики их расчета также аналогичны. Поэтому остановимся лишь на некоторых отличиях.

Геометрические размеры толсто пленочных резисторов рассчитываются с помощью тех же соотношений, что и размеры тонкопленочных. Однако погрешность их изготовления достигает 50%. Это приводит к необходимости подгонки сопротивлений. Ее осуществляют либо образивным, либо лазерным методом. После подгонки отклонение от номинала составляет $\pm 2\%$, а при прецизионной подгонке -- десятые и даже сотые доли процента. Большая погрешность изготовления толсто пленочных резисторов определяется сильной зависимостью их сопротивления от геометрических размеров даже при использовании одной пасты. Поэтому перед проектированием гибридной микросхемы необходимо иметь полную характеристику используемых резистивных паст. Не рекомендуется использовать более трех резистивных паст. Толсто пленочные резисторы обычно имеют прямолинейную форму (рис. 16.1). Использование геометрии с изгибами (рис. 16.2, а, б) нежелательно, так как в этом случае в резисторе образуются области перегрева и сопротивление трудно подгонять к номинальному значению. Коэффициент формы k_{Φ} резистора не должен превышать 10, желательно иметь $k_{\Phi} \leq 3$. С помощью толсто пленочной технологии удастся получать $R = 25 - 10^6$ Ом. При этом используются резистивные пасты, характеризующиеся удельным сопротивлением слоев: $5; 1 \cdot 10^2; 5 \cdot 10^2; 3 \cdot 10^3; 6 \cdot 10^3; 2 \cdot 10^4$ и $5 \cdot 10^4$ Ом/□. Удельная мощность рассеяния $P_0 = 0,5$ Вт/см².

Особенностью толсто пленочных резисторов является зависимость сопротивления от падения напряжения на них. Это ограничивает падение напряжения на резисторе; оно не должно превышать 20 В/мм.

Толсто пленочные резисторы после их изготовления в лучшем случае имеют погрешность 10...20%. Подгонка сопротивления резисторов к номиналу с помощью лазерного метода производится так же, как и тонкопленочных резисторов (рис. 16.4). При аб-

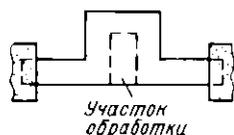


Рис. 16.5. Топология подстраиваемого толсто пленочного резистора

разивной обработке удобно использовать структуру, показанную на рис. 16.5. Штриховой линией показан участок резистивной пленки, удаляемой в процессе абразивной обработки. Указанные методы увеличивают сопротивление резистора, поэтому при необходимости подстройки его сопротивление следует проектировать заниженным.

Конденсаторы. Тонкопленочные конденсаторы имеют структуру, показанную на рис. 16.6,а,б. Верхняя обкладка (ВО) конденсатора вписывается в нижнюю (НО), а последняя — в слой диэлектрика. Это исключает возможность замыкания обкладок по их периметру и устраняет погрешность от несовмещения. Конденсаторы, как правило, изготавливаются однослойными и имеют емкость от десятков пикофарад до сотых долей микрофарады.

Емкость пленочного конденсатора определяется по обычной формуле [см. (11.1)]:

$$C = \epsilon_d \epsilon_0 A_{н.о} k_{кр} h, \quad (16.11)$$

где ϵ_d — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $A_{н.о}$ — площадь верхней обкладки. Отличие соотношения (16.11) от (11.1) заключается в наличии коэф-

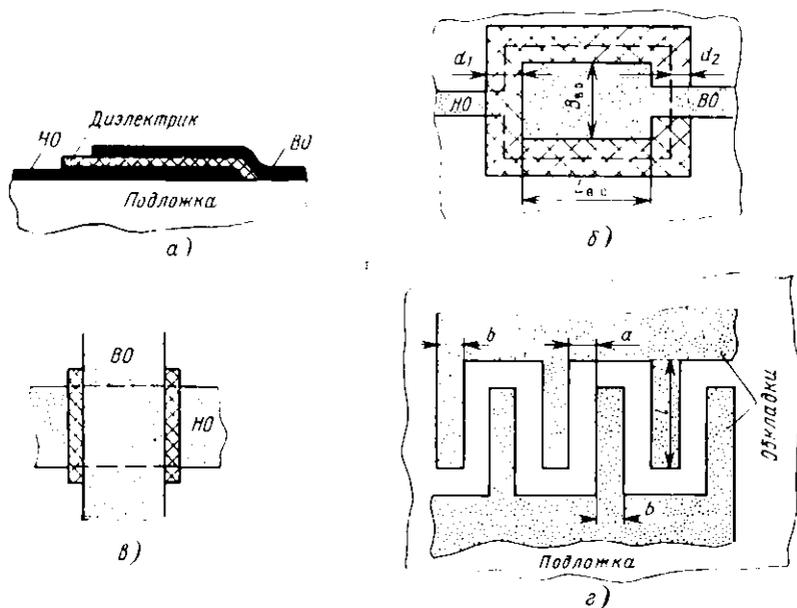


Рис. 16.6. Структура (а) и топология пленочных конденсаторов с обкладкой прямоугольной формы (б), в виде пересекающихся проводников (в) и гребенчатой формы (г)

коэффициента $k_{кр}$, учитывающего влияние краевого эффекта на емкость. Значение $k_{кр}$ можно представить как

$$k_{кр} = \begin{cases} 1 & \text{при } A_{в.о} \geq 0,05 \text{ см}^2; \\ 1,3 - 6A_{в.о} & \text{при } 0,01 \leq A_{в.о} \leq 0,05 \text{ см}^2, \end{cases} \quad (16.12)$$

где $A_{в.о}$ в см^2 . Если $1 \leq A_{в.о} \leq 10 \text{ мм}^2$, то рекомендуется изготавливать конденсаторы в виде двух перекрывающихся полосок, разделенных слоем диэлектрика (рис. 16.6,в), что позволяет уменьшить погрешность емкости изготавливаемого конденсатора. Обычно минимальная площадь ВО не менее 1 мм^2 , а суммарная площадь всех ВО — не более 2 см^2 . При $A_{в.о} < 1 \text{ мм}^2$ (соответствующая емкость составляет десятки пикофарад) необходимо либо выбрать диэлектрик с меньшей удельной емкостью, либо конструировать конденсатор в виде системы последовательно соединенных конденсаторов. Возможно также использовать конденсатор с гребенчатой структурой, показанной на рис. 16.6,г. Емкость такого конденсатора обусловлена краевыми эффектами

$$C = (\epsilon_{11} + 1) \epsilon_0 l [2A_1(N - 1) + A_2], \quad (16.13)$$

где

$$A_1 = 0,61 (h_{11} \cdot a)^{0,25} (b / h_{11})^{0,44};$$

$$A_2 = 0,77b / [(2N - 1)(a + b)] + 0,41;$$

N — число секций обкладок (на рис. 16.6,г число секций $N=3$) h_{11} — толщина подложки.

Геометрические размеры тонкопленочного конденсатора рассчитываются исходя из допуска на номинал конденсатора, рабочего диапазона температур и напряжения U_p .

Для обеспечения заданного напряжения U_p минимальная толщина диэлектрика должна удовлетворять условию

$$h_{\min} \geq k_s U_p / E_{проб}. \quad (16.14)$$

где $k_s = 2 - 3$ — коэффициент запаса по напряжению; $E_{проб}$ — электрическая прочность диэлектрика. Величина h_{\min} определяет максимальную удельную емкость C_0 на мм^2 , обеспечивающую необходимое напряжение U_p .

Допуск на номинал конденсатора складывается из погрешностей в геометрических размерах ВО конденсатора, толщины диэлектрика и температурной нестабильности:

$$\Delta C / C = \delta_A + \delta_h + \delta_T, \quad (16.15)$$

где $\delta_A = \Delta A_{в.о} / A_{в.о}$; $\delta_h = \Delta h / h = 0,05 - 0,10$; $\delta_T = \Delta T \cdot \text{ТКЕ}$. Введя $k_\Phi = L/B$ (рис. 16.6,б) и считая $\Delta L_{в.о} = \Delta B_{в.о}$, получим

$$\delta_A = \Delta L_{в.о} (1 + k_\Phi) \sqrt{k_\Phi A_{в.о}}.$$

Для обеспечения допустимой точности δ_A необходимо, чтобы

$$A_{в.о} \geq (\Delta L_{в.о} / \delta_A)^2 (1 + k_\Phi)^2 / k_\Phi. \quad (16.16a)$$

Условие (16.16а) фактически определяет максимальную удельную емкость ($C_{0 \max 2}$), которая обеспечивает требуемую величину δ_A :

$$C_{0 \max 2} = C (\delta_A \Delta L_{н.о})^2 k_{\Phi} / (1 + k_{\Phi})^2. \quad (16.16б)$$

Значение

$$C_0 = \min \{ C_{0 \max 1}; C_{0 \max 2} \}$$

обеспечивает заданное U_p и требуемое значение δ_A . Емкость C_0 определяет геометрические размеры конденсатора. Допуск на номинал конденсатора обычно составляет 15 ... 20 %.

Форма конденсатора может быть не только прямоугольной (рис. 16.16,б,в), но и фигурной (для наилучшего использования площади подложки). Емкость конденсатора практически не зависит от формы обкладок при постоянной площади их перекрытия. Величину δ_A можно определить как

$$\delta_A \approx P \Delta / A_{н.о},$$

где Δ — отклонение линейного размера от расчетного, P — периметр.

Пример. Рассчитать геометрические размеры тонкопленочного конденсатора $C = 1000$ пФ с $U_p = 50$ В, диапазоне температур +20 ... 100 °С и допуском на номинал ± 15 %. Конденсатор изготавливается с помощью фотолитографии, $\Delta L_{н.о} = \pm 10$ мкм, расстояние между границами верхней и нижней обкладок $d_1 = 0,2$ мм, а между границей нижней обкладки и диэлектрика $d_2 = 0,1$ мм, $\Delta h/h = 0,1$. Конденсатор имеет квадратную форму ($k_{\Phi} = 1$).

Из табл. 9.3 в качестве материала диэлектрика выберем монооксид кремния (SiO₂): $\epsilon \approx 5,5$; $E_{пр} = 2 \cdot 10^6$ В/см; ТКЕ = $2 \cdot 10^{-1}$ 1/К. Из соотношения (16.14) для $k_{\alpha} = 3$ найдем $h_{\min} \geq 0,75$ мкм. Для $h_{\min} = 0,75$ мкм из (11.1а) получим $C_{0 \max 1} = 6490$ пФ/см². Из соотношения (16.15)

$$\delta_A = \Delta A_{н.о} / A_{н.о} = \Delta C / C - \Delta h / h - \Delta T \cdot \text{ТКЕ}.$$

При заданных $\Delta C / C$, $\Delta h / h$, ТКЕ и перепаде температур $\Delta T = 80$ °С (относительно комнатной температуры) получим $\delta_A = 0,034$. Из (16.16б) имеем $C_{0 \max 2} = 0,289$ мкФ.см². Из двух значений $C_{0 \max}$ выбираем минимальное отношение $C / C_0 = 0,154$ см², поэтому из условия (16.12) при $k_{в.р} = 1$ площадь ВО конденсатора $A_{н.о} = C / (C_0 k_{в.р}) = 0,154$ см². Так как $k_{\Phi} = 1$, то геометрические размеры ВО с точностью ± 5 мкм равны:

$$L_{н.о} = B_{н.о} = \sqrt{A_{н.о}} \approx 3,92 \text{ мм}.$$

Геометрические размеры ИО и диэлектрика (L_d , B_d) равны соответственно

$$L_{н.о} = B_{н.о} = L_{н.о} + 2d_1 = 4,32 \text{ мм}; \quad L_d = B_d = L_{н.о} + 2d_2 = 4,52 \text{ мм}.$$

Отклонение от номинального значения менее 10 ... 15 % получается в подстраиваемых пленочных конденсаторах. Использование в качестве диэлектрика пьезоокиси тантала также позволяет уменьшить отклонение от номинального значения до 5 %.

Добротность конденсатора или обратная ей величина $\operatorname{tg} \delta$ определяется активными потерями в металлических обкладках конденсатора ($\operatorname{tg} \delta_M$) и диэлектрика ($\operatorname{tg} \delta_d$):

$$Q^{-1} = \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} \delta_M + \operatorname{tg} \delta_d,$$

где $\operatorname{tg} \delta_d$ (см. табл. 9.3) не превышает 0,02; $\operatorname{tg} \delta_M \approx 2\omega r_{M.п} C$, где $r_{M.п}$ — эффективное сопротивление обкладки конденсатора переменному току.

Для анализа поведения конденсатора при повышенных частотах целесообразно его рассматривать как распределенную RC -цепочку. В большинстве случаев выводы от конденсатора расположены с противоположных сторон (см. рис. 16.6,б). В этом случае конденсатор можно представить схемой рис. 13.10,а при холостом режиме работы [$I_2(s) = 0$]. Решая систему уравнений (13.17) для этого случая, получим

$$Z(s) = U_1(s) / I_1(s) = (R' \sqrt{s \gamma}) \operatorname{cth} \sqrt{s \gamma}. \quad (16.17a)$$

Разлагая функцию (16.17a) в ряд Маклорена и оставляя два первых члена, имеем

$$z(s) \approx r_M/3 + 1/(sC), \quad (16.17б)$$

т. е. эффективное сопротивление обкладки в три раза меньше сопротивления по постоянному току r_M ($r_{M.п} = r_M/3$). Тогда

$$\operatorname{tg} \delta_M \approx 2\omega r_M C/3. \quad (16.18)$$

При ином расположении выводов обкладок и при фигурных обкладках значение $\operatorname{tg} \delta_M$ увеличивается. Поэтому при конструировании конденсаторов, работающих на частотах $f \geq 10$ МГц, рекомендуется делать обкладки прямоугольной формы с выводами, расположенными с противоположных сторон, и выбирать ширину выводов, равную ширине обкладок.

Толстопленочные конденсаторы рассчитываются аналогично и по тем же формулам, что и тонкопленочные. Они изготавливаются емкостью $C = 50 \dots 2500$ пФ с погрешностью $\pm 15\%$ и имеют $U_{проб} \geq 150$ В. В некоторых случаях допускается подгонка конденсаторов абразивным методом, обеспечивающая точность до 1%.

Пленочные индуктивные элементы. В гибридных микросхемах в качестве индуктивности наиболее часто используются плоские спирали (рис. 16.7) из материалов высокой проводимости. Основными параметрами индуктивных элементов являются: индуктивность L , добротность Q и собственная резонансная частота f_0 , определяемая индуктивностью и межвитковой емкостью.

На рис. 16.7 показаны два типа спиралей: круглой (а) и квадратной (б) формы. При одинаковых площадях последняя дает несколько большую (приблизительно на 10%) индуктивность, но меньшую добротность из-за большей длины спирали и паличия изгибов. Поэтому в основном используются круглые спирали. Вследствие ограничений на геометрические размеры значение индуктивности не превышает единиц микрогенри.

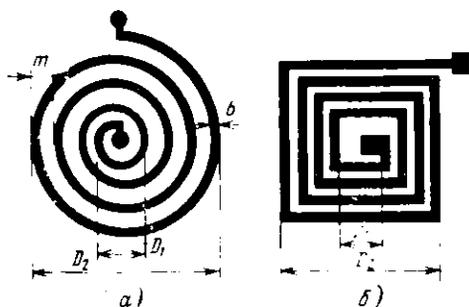


Рис. 16.7. Топологии катушек индуктивности круглой (а) и прямоугольной (б) формы

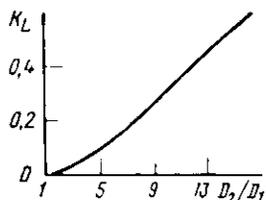


Рис. 16.8. Зависимость характеристического коэффициента k_L катушки индуктивности от ее геометрических размеров

Обычно полагают, что внешний диаметр $D_2 \leq 10$ мм, а внутренний $D_1 \geq 0,5$ мм. Из-за малого значения L индуктивные элементы можно использовать при рабочих частотах, больших 30 ... 50 МГц. В структурах катушек индуктивности рис. 16.7 один из выводов находится внутри спирали. Если необходимо его вывести наружу, то вывод проводят по слою диэлектрика, нанесенного на витки.

Для оценки величины индуктивности используется выражение

$$L = (k_L/m)^2 D_1^3, \quad (16.19)$$

где L в мкГн; m , D_1 в мм. Значение коэффициента k_L находится из кривой рис. 16.8. Ориентировочная величина добротности

$$Q = 16 f D_1 k_L^2 b / \{R_s m [(D_2/D_1)^2 - 1]\}, \quad (16.20)$$

где f в МГц; D , b , m в мм и R_s в Ом/□. С повышением частоты из-за влияния межвитковой емкости и действия скин-эффекта меняются параметры индуктивной катушки. Индуктивность

$$L \approx L_0 [1 + (f/f_0)^2], \quad (16.21)$$

где L_0 — индуктивность на низкой частоте; f_0 — собственная резонансная частота:

$$f_0 \approx v (4l \sqrt{\epsilon_n}). \quad (16.22)$$

Здесь l — длина проводника катушки в мм; $v = 3 \cdot 10^{11}$ мм/с — скорость света; ϵ_n — в отн. ед.

При расчете геометрических размеров катушки индуктивности ширина витка (при заданной добротности) определяется из соотношения (16.20). Так как последнее не учитывает влияние скин-

эффекта, то реальную ширину следует взять в 1,5 ... 2,0 раза больше расчетной. Затем из заданного значения L определяют остальные геометрические размеры.

Пример. Рассчитать индуктивность и добротность (на частоте 50 МГц) катушки, показанной на рис. 16.6*a* и изготовленной из серебра. Примем: $D_1 = 0,5$ мм; $b = 0,1$ мм; $m = 0,2$ мм; $n = 10$; толщина пленки серебра $h = 10$ мкм; удельное сопротивление серебра $\rho = 1,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·см (см. табл. 14.4).

Из выражения (16.19) и данных рис. 16.8 получим $L = 0,27$ мкГн. Из (16.20) при $R_s = \rho/h = 1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом/□ получим $Q \approx 130$. Реальная добротность будет в 2 ... 3 раза меньше.

Проводники. Проводники используются для соединения различных элементов и компонентов гибридной микросхемы. Значения R_s тонкопленочных проводников составляют от сотых до десятых долей Ом/□.

Рассмотрим влияние величины перекрытия проводником (d) резистивной пленки (рис. 16.1) на переходное сопротивление. Сопротивление области перекрытия

$$R_{\text{пер}} = (V \overline{R_s \rho_n / b}) \operatorname{cth} (d \sqrt{\overline{R_s \rho_n}}), \quad (16.23a)$$

где R_s — сопротивление слоя резистивной пленки; ρ_n — удельное переходное сопротивление контакта в Ом·мм²; b и d в мм. Из выражения (16.23a) следует, что при $d \sqrt{\overline{R_s / \rho_n}} \geq 2,5$

$$R_{\text{пер min}} \approx \sqrt{\overline{R_s \rho_n}} / b. \quad (16.23b)$$

Однако выполнение (16.23b) требует значительной величины d . Уменьшение d до

$$d = 1,5 \sqrt{\overline{\rho_n / R_s}} \quad (16.24)$$

приводит к увеличению переходного сопротивления лишь на 10%. Превышение величиной d значения, получаемого из (16.24), практически не ухудшает характеристик контакта. Обычно $\rho_n = 0,05 \dots 0,25$ Ом·мм².

Пленочные проводники характеризуются теми же паразитными параметрами, что и проводники в полупроводниковых микросхемах (см. § 14.3). Собственная паразитная емкость

$$C = 0,0241 l \epsilon_p / \ln (4 l / b), \quad (16.25a)$$

где l — длина проводника в мм; b — ширина проводника в мм; C — в пФ. Емкость параллельных близлежащих проводников шириной b и расстоянием между ними $2a$ можно определить как

$$C = 0,0442 l \epsilon_p \operatorname{th} [\pi a / (2 h_n)] \operatorname{cth} [\pi (a + b) / (2 h_n)], \quad (16.25b)$$

где h_1 — толщина диэлектрической подложки; l — в см; C — в пФ. Наличие паразитной индуктивности сказывается на частотах $f \geq 50$ МГц и ее величина оценивается по формуле

$$L = 0,02 l [2,31g (2l/b + 0,22 b/l + 0,5)], \quad (16.25в)$$

где L дано в мкГн, l — в мм.

Организация многослойного монтажа в гибридных микросхемах проводится так же, как в полупроводниковых микросхемах (см. § 14.3). В качестве диэлектриков используются монокристаллы кремния и германия.

Обеспечение допустимого падения напряжения на проводнике осуществляется выбором соответствующего материала и геометрических размеров. При протекании по проводникам больших токов выбор их ширины проводится из условия, что удельная рассеиваемая мощность в проводнике не более $1 \dots 2$ Вт/см².

У толстопленочных проводников $R_s = 0,01 \dots 5$ Ом/□ в зависимости от типа используемой пасты. Соотношение между максимальным током I , протекающим через проводник, и его шириной (b) имеет вид:

| | | | | | | | | | | |
|----------|---|---|---|---|---|------|-----|-----|-----|-----|
| I , А | . | . | . | . | . | 0,15 | 0,3 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| b , мм | . | . | . | . | . | 0,3 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 6,0 |

16.2. РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Разработку топологии тонкопленочных гибридных микросхем можно разбить на следующие этапы: получение исходных данных; разработка коммутационной схемы; расчет геометрических размеров пленочных элементов; разработка предварительных вариантов топологии; выбор окончательного, оптимизированного варианта топологии и проверка его качества. Как видно из названий этапов, они близки с соответствующими этапами разработки топологии полупроводниковых микросхем (см. § 15.1). Поэтому остановимся лишь на особенностях.

Разработка коммутационной схемы необходима для определения взаимного расположения навесных компонентов (НК) и пленочных элементов, а также для выбора наиболее простого варианта соединения элементов и компонентов схемы с малым числом пересечений пленочных проводников и их малой длины. Начинают разработку с выделения в принципиальной схеме пленочных элементов и НК. Последние заменяются контактными площадками, соответствующими цоколевке НК. Если выводы НК гибкие, то предварительная замена НК контактными площадками не обязательна. Производится также предварительное размещение внешних выводов на периферийных частях микросхемы в соответ-

ствии с конструктивными требованиями. При анализе полученной схемы соединений следует изыскивать возможности уменьшения длины соединительных пленочных проводников, сокращения числа их пересечений. Для этого производится перестановки пленочных элементов.

Разработка предварительных вариантов топологии состоит в изготовлении эскизных чертежей, выполненных в масштабе 10 : 1 или 20 : 1. Грани элементов и компонентов должны располагаться параллельно осям координат. Необходимыми данными для этого этапа являются коммутационная схема, рассчитанные геометрические размеры пленочных элементов и геометрические размеры ИК.

При разработке эскизных чертежей необходимо обращать внимание на использование наиболее простых форм элементов, равномерность их размещения на подложке, увеличение конструктивных и технологических допусков и т. д.

Разработку предварительного варианта топологии целесообразно проводить в следующей последовательности: размещение внешних контактных площадок; прямоугольных резисторов с $k_{\Phi} \leq 10$; конденсаторов с площадью ВО до 25 мм² и индуктивностей; резисторов сложной конфигурации и конденсаторов больших номиналов. Кроме того, элементы и компоненты микросхемы, рассеивающие большую мощность, следует равномерно размещать по площади платы. После размещения элементов на подложке осуществляется разводка (траассировка) проводников. В некоторых случаях при заданной технологии изготовления (односторонняя металлизация) и выбранном расположении пленочных элементов и ИК осуществить разводку невозможно. При этом необходимо произвести перестановку пленочных элементов и ИК.

При разработке варианта топологии следует предусматривать возможность измерения номинальных значений пленочных элементов. Обычно в первом предварительном варианте не удается получить приемлемую конфигурацию слоев. Поэтому делается 2-3 варианта топологии с изменением геометрии пленочных элементов, соответствующей ее корректировкой для обеспечения заданных параметров пленочных элементов.

Получение окончательного варианта топологии и проверка его качества проводится по аналогии с полупроводниковой микросхемой.

Топология толстопленочных микросхем разрабатывается аналогично топологии тонкопленочных микросхем. Некоторые отличия связаны с более простыми конфигурациями толстопленочных элементов. Этой особенностью, в первую очередь, определяются требования облегчить нанесение проводящих и резистивных паст и облегчения подгонки сопротивления резисторов. Все резисторы должны быть ориентированы так, чтобы их длинные стороны были параллельны и имели направление, совпадающее с направлением движения ракеля.

Глава 17. КОНСТРУИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

17.1. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ

К большим интегральным микросхемам (БИС) условно можно отнести схемы 4-й степени интеграции (число элементов более 1000).

Существуют две разновидности БИС: полупроводниковые и гибридные. Рассмотрим особенности тех и других.

Полупроводниковые БИС. Полупроводниковые БИС содержат на одном кристалле сложные функциональные узлы: микропроцессоры и запоминающие устройства. При создании БИС можно выделить три основных направления. Первое связано с совершенствованием существующих технологических процессов изготовления БИС и созданием новых. Это относится к повышению разрешающей способности литографии, использованию лонной имплантации и др. Однако имеются теоретические пределы для плотности элементов: для МДП-транзисторов $10^7 \dots 10^8$, для биполярных транзисторов 10^6 на квадратном сантиметре. Использование многослойной металлизации также позволяет увеличивать плотность элементов благодаря уменьшению длины межэлементных соединений и числа пересечений проводников. Второе направление использует увеличение размеров кристалла. Так, если в 1970—1973 гг. типовым размером кристалла был $1,5 \times 1,5$ мм², то в 1973—1975 гг. он увеличился до 6×6 мм², а в настоящее время — до 10×10 мм². Третье направление основано на разработке новых схемотехнических решений.

Выбор номенклатуры разрабатываемых БИС осуществляется двумя способами. Первый связан с созданием БИС, рассчитанных на весьма широкое применение, но с некоторой избыточностью при выполнении конкретных задач. Это относится к микропроцессорным БИС, микросхемам памяти и некоторым другим.

Второй способ основан на использовании коммутированных (без металлизации) матриц логических ячеек, называемых базовым кристаллом. Конструктивно кристалл матричной БИС представляет собой совокупность регулярно расположенных логических ячеек (гомологических фрагментов). Между последними предусматриваются свободные промежутки, необходимые для соединений. Матричная БИС выполняет заданные функции лишь на заключительном этапе изготовления, когда осуществлены необходимые межэлементные соединения.

С повышением степени интеграции повышается быстродействие микросхем, так как минимизируются паразитные параметры, вносимые металлизированными соединениями. Однако повышение степени интеграции связано и с рядом трудностей, проявляющихся на различных этапах создания микросхемы, особенно при разработке ее топологии. Трудоемкость ручного проектирования микросхем может быть приближенно оценена по следующим формулам:

$$T_{\text{а}} = 70 N^{0,55} \quad (17.1а)$$

для аналоговых схем,

$$T_{\text{ц}} = 45 N^{0,55} \quad (17.1б)$$

для цифровых схем.

Здесь N — число элементов микросхемы; T — трудоемкость проектирования в ч. При полной автоматизации проектирования микросхемы трудоемкость проектирования

$$T = 22 N^{0,22}. \quad (17.1в)$$

Из анализа выражений (17.1) видно, что проектировать БИС без применения ЭВМ практически невозможно. При количестве элементов 10^6 автоматизация проектирования БИС позволяет уменьшить сроки разработки приблизительно в 120 раз.

Гибридные БИС (БГИС). В гибридных микросхемах, так же как и в полупроводниковых, происходит увеличение степени интеграции. В БГИС на одной подложке могут быть объединены как различные элементы, так и компоненты, в том числе микросхемы и БИС, выполненные по различным технологиям (биполярная, МДП, тонко- и толстопленочная и др.). Это позволяет обеспечить широкий диапазон электрических параметров и гибко решать сложные инженерные задачи по созданию микроэлектронной аппаратуры.

Технологию БГИС можно рассматривать как замену существующих методов многослойного печатного монтажа при размещении на подложках бескорпусных полупроводниковых микросхем, БИС и других компонентов. Чаще всего БГИС содержат бескорпусные микросхемы и БИС, объединенные металлической разводкой. Поэтому создание БГИС обычно сводится к коммутации микросхем и БИС в единый функциональный комплекс, называемый микросборкой.

Дальнейшее совершенствование конструкции и технологии изготовления микроэлектронной аппаратуры заключается в замене ее блоков на БГИС и переходе от печатных плат к платам, изготавливаемые по гибридной технологии.

17.2. ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ

Основными требованиями к элементам БИС являются минимизация их геометрических размеров и площади кристалла, используемой для изоляции элементов, если она требуется.

МДП-транзисторы с малой длиной канала. По мере уменьшения длины канала свойства МДП-транзистора начинают резко отличаться от свойств обычных длинноканальных приборов (см. § 14.2). Короткоканальные эффекты обусловлены существенно двумерным характером распределения электрических полей в активной области и сравнительно высокими абсолютными значениями напряженности полей.

Если при неизменной концентрации легирующей примеси в подложке сокращать длину канала, то она станет величиной порядка толщины слоев пространственного заряда $p-n$ переходов истока и стока. При этом распределение потенциала в канале будет равным образом определяться поперечным полем E_x , обусловленным напряжением на затворе и подложке, и продольным полем E_y , стока транзистора. Иными словами, распределение потенциала в таком короткоканальном приборе имеет двумерный характер, и для его описания уже нельзя использовать приближение плавного канала, которое предполагает, что $E_x \gg E_y$. Двумерный характер распределения потенциала существенно изменяет допороговый участок характеристики прибора, обуславливает нежелательную зависимость порогового напряжения от длины канала и напряжений смещения на электродах, уменьшает выходное сопротивление и др.

При повышенных значениях электрических полей, характерных для короткоканальных приборов, становится важной полевая зависимость подвижности, которая в конечном итоге приводит к насыщению дрейфовой скорости (см. § 18.2). Высокие электрические поля приводят также к разогреву носителей и соответствующей инжекции горячих носителей в окисел. Эта зарядка обуславливает сдвиг порога, дрейф характеристик и уменьшение крутизны прибора.

Все перечисленные короткоканальные эффекты усложняют работу прибора и ухудшают его рабочие характеристики. Поэтому в практике конструирования следует стремиться к устранению или минимизации этих эффектов, чтобы «физически» короткоканальный транзистор был «электрически» подобен длинноканальному. Такое подобие реализуется при использовании масштабирования (см. § 17.4).

Ниже рассмотрены МДП-транзисторы с малой длиной канала, в которых не проявляются короткоканальные эффекты.

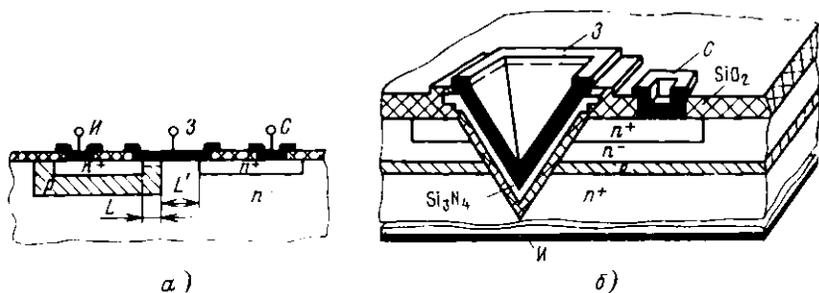


Рис. 17.1. Структура D-МДП-(а) и V-МДП-(б) транзисторов

На рис. 17.1а показан D-МДП-транзистор. Отличие от транзистора на рис. 11.1 состоит в том, что для получения области истока (n^+ -типа) и подзатворной области (p -типа) используется одно и то же окно. Это позволяет хорошо контролировать значение L так же, как и толщину базы биполярного транзистора ($L \leq 1$ мкм). Длина канала определяется длиной только области p -типа. Область n -типа длиной L' является дрейфовой; ее поверхностный слой сильно обогащен электронами (еще до образования канала). Поэтому выходной сигнал (на стоке) появляется практически сразу после прохождения носителями канала (p -область). Нормальное функционирование транзистора обеспечивается тем, что концентрация примесей в области канала более чем на порядок превышает концентрацию примесей в n -области.

Еще меньшую площадь имеет V-МДП-транзистор (рис. 17.1б) вследствие «вертикального» расположения электродов транзистора и общей области истока для всех транзисторов БИС. Транзистор изготавливается на кремнии с кристаллографической ориентацией $\langle 100 \rangle$, которая обеспечивает селективное травление (см. § 2.5) с углом у вершины $\theta = 70,6^\circ$. Этот транзистор, так же как и D-МДП-транзистор, имеет в стоковой цепи n -область, а длина канала определяется толщиной p -области. Несмотря из технологических требований к стабильности характеристик подзатворный диэлектрик имеет структуру двуокись кремния - нитрид кремния. Подзатворный окисел не одинаков по толщине. Обозначим h_c , h_n и h_p толщины слоев областей стока (n^+), n - и p -типов. Тогда длина канала

$$L = h_p / \cos(\theta/2); \quad (17.2a)$$

средняя ширина канала при квадратной форме основания, вытравленной пирамиды, со стороной равной a и при $h_p \ll h$ [$h = a \operatorname{tg}(\theta/2)$ — высота пирамиды], имеет вид

$$Z = 8 [a/2 - (h_c + h_n + h_p/2) \operatorname{tg}(\theta/2)], \quad (17.2b)$$

а отношение

$$Z/L = (8 h_p) \cos(\theta/2) [a, 2 - (h_c + h_n + h_p) 2 \operatorname{tg}(\theta/2)]. \quad (17.2в)$$

Малая длина каналов В-МДП- и V-МДП-транзисторов позволяет изготавливать логические схемы на их основе с временем переключения порядка единиц наносекунд.

Пример. Рассчитать L , Z и Z/L для V-МДП-транзистора. Примем $a = 10$ мкм; $h_c = h_n = h_p = 1$ мкм.

Используя соотношения (17.2), получаем $L = 1,2$ мкм; $Z = 26$ мкм, $Z/L = 22$.

Биполярные транзисторы. Показанные на рис. 10.1 изопланарные транзисторы имеют площадь 190 мкм^2 без учета площади на изоляцию. Однако в СБИС используются кроме такого типа транзисторов другие транзисторы, занимающие меньшую площадь.

На рис. 17.2а показан n - p - n транзистор и диод, изготовленный по технологии со щелевой изоляцией. Щелевая изоляция, в отличие от изопланарной, характеризуется в несколько раз меньшей емкостью на подложку из-за того, что при создании противоканального слоя не исключается соприкосновение p^+ -области и n^+ -области скрытого слоя. Благодаря этому напряжение пробоя коллектор-подложка увеличивается по сравнению с изопланарной изоляцией более чем в два раза. Из-за отсутствия принципиальных ограничений на глубину канавок предпочтительнее формировать структуру со сплошным слоем, что позволяет исключить две операции фотолитографии, характерные для технологии «изопланар», необходи-

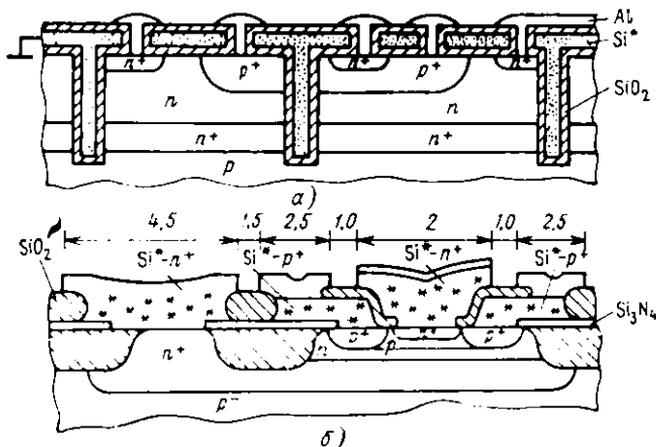


Рис. 17.2. Биполярные транзисторы типа n - p - n , изготовленные по технологии «со щелевой изоляцией» (а), и с «поликремниевым эмиттером» (б)

мые для изготовления p^+ и n^+ локальных областей перед эпитаксиальным наращиванием пленки n -типа. Таким образом упрощается процесс изготовления пластин-заготовок, так как для любой топологии СВНС можно формировать одинаковые эпитаксиальные структуры со сплошным скрытым слоем.

Еще одно немаловажное преимущество этой технологии — возможность повышения радиационной стойкости СВНС путем подачи на полукремний (Si^*) нулевого или отрицательного потенциала — это превращает инверсию противоканального слоя на дне канавки.

Ширина канавки — единицы микрометров.

Фирмой Fairchild Semiconductor (США) получен транзистор площадью около 50 мкм^2 со щелевой изоляцией.

На рис. 17.2,б показан транзистор изготовленный фирмой NTT (Япония) с так называемым «полукремниевым» эмиттером. Такой транзистор имеет площадь около 100 мкм^2 , глубину залегания эмиттерного перехода $0,5 \text{ мкм}$ и толщину металлургической базы около $0,3 \text{ мкм}$. Этот транзистор используется в сверхскоростных ЭСЛ-схемах.

Название транзистора представляется нам неудачным, так как эмиттером, как и всегда, является n^+ -слой. Полукремний в данном случае служит двум целям: является источником примеси и создает n^+ -эмиттер; граница раздела $Si-Si^*$ имеет конечную скорость поверхностной рекомбинации неосновных носителей, что уменьшает дырочную составляющую эмиттерного тока и увеличивает коэффициент инжекции, а следовательно и коэффициент усиления (см. § 12.3).

17.3. ЗАДАЧИ МАШИННОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

Для «ручного» создания топологии БИС, как следует из § 17.1, требуется очень большое время (порядка нескольких человеко-лет). Такие сроки не устраивают ни разработчиков, ни потребителей. Поэтому в настоящее время получают все более и более широкое распространение вычислительные средства, предназначенные для автоматизации процесса конструирования БИС. Решение указанной проблемы включает:

1. Разработку для всех этапов проектирования методов и алгоритмов, реализованных в виде программ, т. е. создание прикладного математического обеспечения.

2. Создание системы технических средств, имеющих в своем составе центральный вычислительный комплекс большой емкости, периферийную аппаратуру для отображения, редактирования и до-

кументирования информации, появляющейся в процессе работы. Все системы должны быть объединены в единый комплекс.

3. Разработку системного программного обеспечения на базе существующих операционных систем для проектирования топологии БИС.

Автоматизация проектирования топологии БИС развивается по следующим направлениям: расчет структуры и геометрии элементов; синтез топологии на типовых ячейках; синтез топологии на элементном уровне; компоновка топологии и ее редактирование; разработка фотошаблонов.

Сейчас не существует программного обеспечения, позволяющего полностью автоматизировать процесс конструирования БИС. Различные ступени этого процесса алгоритмизированы и автоматизированы в разной степени. Указанные задачи, в основном, решаются в так называемом интерактивном режиме, т. е. в режиме взаимодействия человек-машина. Рассмотрение машинных методов конструирования БИС в полном объеме не представляется возможным, поэтому далее рассматриваются лишь некоторые аспекты этой проблемы.

17.4. ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ

При разработке топологии БИС геометрия активных и пассивных элементов определяется заданными электрическими параметрами. При этом проектировщик руководствуется расчетом и использованием библиотеки топологий элементов, разработанных ранее для аналогичных схем. Однако аналитический расчет не всегда обеспечивает требуемые параметры и их явную связь со структурой элемента. Поэтому необходим анализ физико-топологической модели. Обычно такие модели используются только для активных приборов, в которых исходными данными являются геометрические размеры областей элементов, физические параметры полупроводниковой пластины и слоев, образующих структуру (распределения концентраций примеси, подвижность, время жизни и др.). Физические параметры определяются из соответствующих электрофизических измерений, а геометрические размеры зависят от рисунка фотошаблона.

Принципы построения физико-топологических моделей. Эти модели должны учитывать все основные эффекты, влияющие на работу элемента, и его реальные электрофизические параметры. Физико-топологические модели весьма сложны, но позволяют получить полную характеристику свойств элемента.

Для разработки физико-топологической модели необходимо связать его входные электрические параметры с параметрами физической структуры и с то-

пологий прибора. В общем случае такая связь описывается трехмерной системой уравнений переноса носителей, непрерывности и Пуассона. Решение трехмерной задачи чрезвычайно сложно и требует очень больших затрат машинного времени, поэтому ее стараются упростить и свести к одномерной или двумерной.

Методы создания физико-топологических моделей транзисторов. Эти методы можно разделить на два вида:

1. Структура транзистора делится на области с объемным зарядом (p - n переход) и без него. Для этих областей находят приближенные решения уравнений, которые впоследствии «сшиваются» на границах раздела. Этот подход может применяться в структурах со значительными геометрическими размерами и глубинами залегания переходов $h \gg 1 \dots 2$ мкм.

2. Структура транзистора не делится на области и исходные уравнения решаются для всей структуры в целом. Очевидно, что методом второй категории свойственны большие математические трудности. Однако транзисторы, используемые в БИС, характерны малыми геометрическими размерами и малыми глубинами залегания переходов, так что установить границы слоев пространственных зарядов можно лишь условно. Поэтому все же целесообразно использовать методы второй категории. В физико-топологических моделях значительную сложность представляет не только решение системы дифференциальных уравнений, но и задание граничных условий.

Для решения исходной системы уравнений [см. (10.1) — (10.5)] — можно использовать ряд алгоритмов. Рассмотрим лишь один из них — итерационный алгоритм Гуммеля для одномерной структуры (рис. 17.3). В качестве независимых переменных взяты: электростатический потенциал $\varphi(x)$ и квазивотенциал Ферми для электронов $\varphi_n(x)$ и дырок $\varphi_p(x)$. Суть этого алгоритма заключается в следующем. На основе физических соображений или упрощенной теории находится нулевое приближение распределения электростатического потенциала $\varphi^0(x)$. Далее определяется напряженность электрического поля, а из

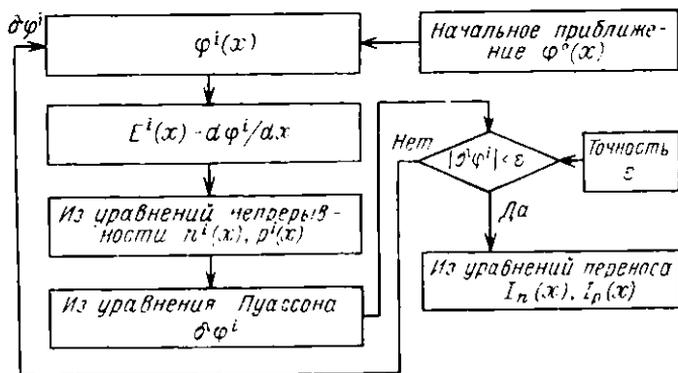


Рис. 17.3. Итерационный алгоритм Гуммеля

уравнений непрерывности $q'_n(x)$, $q'_p(x)$ и, следовательно, $n^0(x)$, $p^0(x)$. Из уравнения Пуассона получим уточнение нулевого приближения $\delta q^0(x)$. В дальнейшем итерационный процесс повторяется. В каждой последующей итерации получается уточненное значение

$$q^{i+1}(x) = q^i(x) + \delta q^i(x).$$

Итерационный алгоритм Гуммеля разработан в предположении достаточного точного начального приближения $q^0(x)$. При этом $|\delta q^i(x)|/|q^i(x)|$ стремится к нулю, если i стремится к бесконечности. Реально итерационный процесс заканчивается, когда $|\delta q^i(x)| < \epsilon$, где ϵ — заданная точность. Тогда на последнем этапе вычисляются токи $I_n(x)$ и $I_p(x)$, с помощью которых можно определить коэффициент передачи транзистора.

Физико-топологические модели определяют практически все параметры транзистора. Однако в большинстве случаев наиболее важный параметр задается, и он должен иметь экстремальное значение. В этом случае задача создания физико-топологической модели сводится к обеспечению указанного требования.

Разработать физико-топологические модели элементов схемы целесообразно, так как они формируются в едином технологическом цикле, и просто невозможно. Поэтому физическая структура определяется только для основного, наиболее важного элемента — транзистора. В качестве исходных данных для расчета других элементов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), входящих в состав подупроводниковой БИС, используется выбранная физическая структура основного транзистора. Параметры остальных элементов определяются только заданием их геометрии.

Основная трудность, возникающая при использовании математического описания процессов, происходящих в элементах БИС, состоит в том, что численное значение ряда параметров математических моделей неизвестно. Эти параметры обычно определяются с помощью метода наименьших квадратов из условия наилучшего согласования результата расчетов и эксперимента. Это ограничивает область конкретного использования математических моделей лишь теми структурами, на которых проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Существует другой подход, основанный на введении в математическую модель топологически инвариантных параметров, связанных с электрофизическими характеристиками микроэлектронной структуры, и создании специального тестового набора, с помощью которого определяются эти неизвестные параметры. Модель и тестовый набор тесно связаны и ориентированы на машинную обработку данных эксперимента и выполнение вычислений.

Таким образом, этот подход, с одной стороны, имеет достаточно строгую физико-математическую основу, а с другой — вследствие феноменологической природы ориентирован на решение конкретных инженерных задач, что позволяет определить его как инженерно-физический метод проектирования элементов БИС.

Метод пропорциональной микроминиатюризации. Этот метод или, как его

иначе называют, — метод масштабирования позволяет изменять размеры транзисторов без ухудшения их параметров.

Суть метода состоит в том, что вертикальные размеры структуры транзистора (глубины залегания p - n переходов, толщины диэлектрика и т. д.) и напряжения питания уменьшаются в k раз, а концентрация примесей в подложке увеличивается в k раз. Пропорционально уменьшается толщина слоев пространственного заряда p - n переходов, а отношение между толщиной последних и длиной канала (для МДП-транзисторов) остается постоянным. Напряженность поля остается неизменной, так как напряжения и все физические размеры уменьшаются в одинаковое число раз. Из § 14.1 и 14.2 следует, что пропорционально уменьшается пороговое напряжение, а основные характеристики транзистора при напряжении на затворе выше порогового сохраняются с точностью до масштабного множителя k . Параметры «масштабированного» транзистора с меньшими размерами получаются из параметров исходного транзистора уменьшением масштаба по осям токов и напряжений в k раз. Это позволяет предсказать характеристики, параметры транзисторов и схем без предварительного моделирования и значительно ускорить процесс разработки новых микросхем.

Масштабирование сопровождается пропорциональным повышением быстродействия (снижением задержки в k раз), а работа переключения логического или запоминающего элемента снижается пропорционально k^3 . Удельная рассеиваемая мощность остается неизменной, т. е. при масштабировании не возникает проблемы добавочного теплоотвода. При оценке быстродействия учитывают лишь емкости самих транзисторов и пренебрегают емкостями проводников. Параметры проводников (в пределах логического узла) при масштабировании меняются следующим образом: размеры в емкости уменьшаются в k раз, а сопротивление и плотность тока в проводниках увеличиваются в k раз. При этом постоянная времени проводника и падение напряжения на нем не изменяются. Неизменность постоянной времени при повышении быстродействия транзисторов приводит к тому, что время переключения логических элементов в составе схемы будет уменьшаться медленнее, чем $1/k$. Неизменность падения напряжения на проводнике при снижении логических уровней приводит к уменьшению помехоустойчивости при масштабировании. Рост плотности тока приводит к электромиграции и снижению надежности проводников (см. § 14.3). Кроме того, не учитываются особенности эффектов сильного легирования эмиттера биполярного транзистора (см. § 12.2), сильного поля в короткоканальных транзисторах (см. § 17.2) и некоторые другие.

Особняком стоят соединительные линии. Их средняя длина при сохранении площади кристалла остается неизменной, даже возрастает. При достаточно большой длине линий быстродействие элементов будет определяться уже не параметрами этих элементов, а паразитными параметрами соединительных линий. При уменьшении размеров и увеличении быстродействия активных элементов возрастает роль краевых эффектов в соединительных шинах и влияние полупроводниковой подложки (при уменьшении ее удельного сопротивления, см. § 14.3).

Из изложенного следует, что масштабирование имеет ряд недостатков, которые могут привести к отличию ожидаемых и экспериментальных результатов.

17.5. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ

Для топологического проектирования БИС используются математические модели элементов. Их существует несколько разновидностей.

Геометрическая модель. Эта модель характеризует геометрические размеры элемента. Геометрические модели могут быть получены из физико-топологических моделей элемента и расположения его выводов.

Точная геометрическая модель совпадает с топологией элемента и задается поточечным заданием всех входящих в него контуров в прямоугольной системе координат с указанием для каждого контура соответствующего ему номера слоя (эмиттерный, базовый и др.). На рис. 17.4а представлена точная геометрическая модель МДП-транзистора в комплементарной микросхеме (1—4—диффузионная область «кармана»). Как видно из рисунка, каждой узловой точке присваивается определенный номер. Если конфигурация элемента определяется отрезками прямых, параллельных осям координат (X, Y), то такое описание является избыточным. Геометрию элемента можно описать и через одну точку, как показано для области 1-4 (цифры в скобках). Это позволяет уменьшить количество цифр в два раза.

Еще более компактной становится характеристика элемента, если учитывается симметрия расположения контуров: расстояния от внешних границ областей истока, стока и затвора до границы области «кармана» одинаковы; одинаковы расстояния от контактных окон к областям стока и истока до некоторых контуров и др. При этом слои определяются как координатами базовых точек,

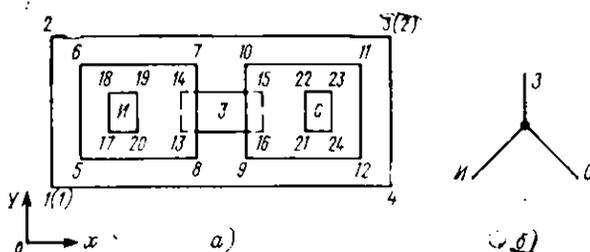


Рис. 17.4. Геометрическая (а) и точечная (б) модели МДП-транзистора

так и соответствующими расстояниями. Наиболее простая геометрическая модель обычно представляет собой прямоугольник, накрывающий элемент (прямоугольник $I-4$), с указанными на нем местами выводов. Эта модель может быть использована на этапе разработки эскиза топологии (см. § 15.1).

Рассмотренная модель отражает геометрию элемента, однако алгоритмизация процесса разработки топологии с ее помощью затруднена. Вследствие этого наряду с геометрической получил распространение другой вид модели элементов.

Точечная модель. В ней элемент представляется в виде точки и исходящими из нее выводами, соответствующими необходимым выводам элемента (рис. 17.4,б). Существуют две модификации модели. В первой модификации модель имеет неупорядоченное множество выводов, т. е. постоянным является только число выводов (например, исток, затвор, сток), а не последовательность их расположения. Во второй — модель учитывает конструкторскую реализацию элемента, т. е. порядок следования выводов, возможные способы присоединения проводников к контактным окнам или их прохождение между ними. Это накладывает определенные ограничения на возможные направления прохождения соединительных и выводных шин. Точечные модели могут быть с успехом использованы для алгоритмизации на этапе разработки эскиза топологии.

17.6. МАШИННАЯ РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ

Создание полностью автоматизированного, формализованного процесса разработки топологии БИС очень сложно. Эту задачу можно сформулировать следующим образом: разместить на плоскости элементы БИС, топология которых задана и провести соединения между ними в соответствии с электрической схемой (оптимально по отношению к определенному набору критериев) при удовлетворении заданным технологическим и конструктивным требованиям и ограничениям. Строгая постановка и решение указанной задачи требуют использования математических моделей элементов и алгоритмов их отображения на плоскости.

Основными факторами, определяющими состав и структуру технических средств для разработки топологии, является заданная производительность комплекса и необходимость эффективного взаимодействия разработчика БИС с ЭВМ (интерактивный режим). Заданная производительность комплекса определяет необходимые вычислительные мощности системы, а эффективное взаимодействие человек — ЭВМ — режим разделения времени. При режиме разделения времени разработчик имеет непосредственный и постоянный контакт с ЭВМ, может принимать решения сразу же после получения первых результатов расчета. Такой режим работы также значительно сокращает время отладки программ.

В общем виде требования к системе машинного проектирования БИС можно определить следующим образом: технические средства системы должны состоять из набора вычислительных средств и периферийного оборудования, объединенных по иерархическому принципу; центральная ЭВМ (одна или несколько) должна иметь достаточно высокое быстродействие и большой объем оперативной и внешней памяти; система должна иметь необходимые аппаратные средства, обеспечивающие работу как в режиме разделения времени, так и в режиме пакетной обработки; рабочие места проектировщиков БИС должны иметь в своем составе мини-ЭВМ с необходимым набором периферийного оборудования и средствами связи с центральной или центральными ЭВМ; структура системы должна быть универсальной, допускающей резервирование и расширение состава по мере совершенствования системы, увеличения ее надежности и производительности.

Главной целью при решении задач синтеза топологии является минимизация площади кристалла при выполнении определенных схемотехнических и технологических ограничений.

Как было указано, автоматизация проектирования топологии разбивается на два направления: синтез топологии на типовых ячейках; синтез топологии на элементном уровне. Рассмотрим каждое из этих направлений подробнее.

Синтез топологии на типовых ячейках. Для этого направления проектирования топологии желательно реализовать высокую плотность монтажа, при которой соединительные проводники занимают бы около 80 % площади кристалла. Здесь решаются следующие основные задачи: компоновка рядов ячеек, размещение рядов ячеек, размещение ячеек в рядах, трассировка соединений ячеек.

В качестве одного из вариантов синтеза топологии на типовых ячейках на рис. 17.5 показана структурная схема.

Входная информация включает список ценней, указания о типах используемых ячеек и конструктивные параметры коммутационного поля. Описания типовых ячеек заданы в библиотеке системы. После предварительной обработки и исправления ошибок исходная информация записывается в архив на магнитной ленте. С помощью специальных указаний задаются размеры ячеек и расстояния между ячейками в ряду. Далее осуществляется разбиение ячеек на ряды, их упорядочение на коммутационном поле и размещение ячеек. По результатам размещения ячеек рассчитываются диаграммы плотности соединений в каналах между рядами, на основании которых уточняется размещение рядов ячеек. Далее осуществляется трассировка соединений. Выполнив анализ результатов трассировки, конструктор может изменить расстояния между рядами или ячейками в рядах, задать новые параметры для компоновки рядов и т. д. Процесс синтеза различных вариантов топологии продолжается до получения результата, удовлетворяющего конструктора. Результатами работы системы яв-

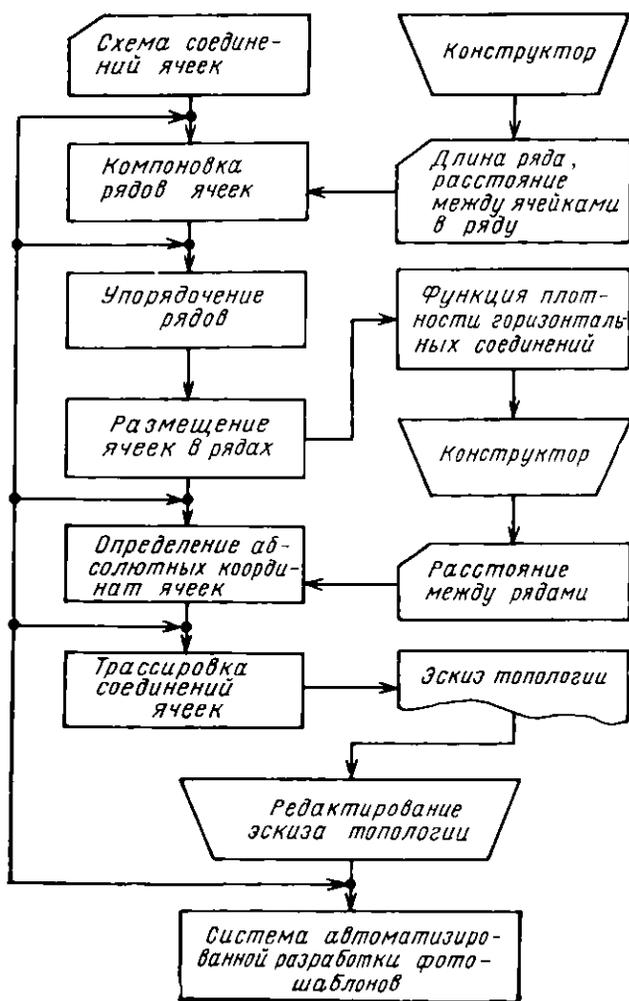


Рис. 17.5. Структурная схема одного из вариантов синтеза топологии на типовых ячейках

ляются послонные слски построенных соединений и список координат межслойных переходов, которые записываются в архив.

Синтез топологии на элементном уровне. Здесь решаются следующие задачи: определение необходимого числа изолированных областей и компоновка в них элементов. Это в первую очередь, относится к БИС на биполярных транзисторах: размещение элементов; трассировка межэлементных соединений; проверка топологии. Рассмотрим их подробнее.

Сначала определяют необходимое число изолированных областей. Принципы компоновки изолированных областей рассмотрены в § 15.1. Ниже рассмотрим некоторые аспекты алгоритмизации задачи определения числа изолированных областей и компоновки в них элементов.

Для автоматизации этого процесса все множество элементов БИС разбивается на подмножества, расположенные в отдельных изолированных областях. Задача состоит в нахождении такого распределения элементов, которое уложится в минимальное количество изолированных областей при минимальном значении целевой функции, обеспечивающей максимальную плотность упаковки элементов. Введем следующие определения.

Вывод, определяющий потенциал изолированной области, называется фундаментальным. Это либо коллектор $n-p-n$ транзистора, либо база горизонтального $p-n-p$ транзистора, либо специальный электрод. Вывод элемента, определяющий его совместимость с другими элементами, помещенными в одну изолированную область, называется характеристическим. Так, у резистора таким выводом является вывод электрода резистора с максимальным потенциалом.

Принципы предварительного распределения элементов БИС по изолированным областям можно свести к следующему: все элементы, имеющие различные потенциалы фундаментальных выводов, помещаются в отдельные изолированные области; в одну изолированную область помещаются элементы, у которых потенциал фундаментального вывода не меньше потенциалов характеристических выводов. В соответствии с этим элементы группируются по отдельным изолированным областям в подмножества. Из сказанного ясно, что в большинстве случаев не существует однозначного распределения элементов или подмножеств по отдельным изолированным областям. Отдельные элементы могут одновременно входить в состав нескольких подмножеств, т. е. являться мультиобластными элементами. В качестве критерия оптимальности разбиения множества элементов на подмножества часто используется критерий наименьшей связанности, что означает наименьшее количество соединений между отдельными изолированными областями. Для реализации решения по этому критерию переставляют мультиобластные элементы. Часто перестановки осуществляются парами элементов, имеющих общий узел. При одинаковом значении критерия оптимальности для ряда вариантов предпочтение отдается варианту с максимальным количеством элементов, расположенных в одной области.

Размещение элементов. Эта одна из основных задач в проектировании топологии БИС. Критерием оптимальности размещения элементов может быть минимизация следующих целевых функций: суммарной длины соединений; наидлинейшей связи; числа пересечений соединений; числа слоев коммутации. Наибольшее распространение получил критерий обеспечения минимальной суммарной длины соединений.

Алгоритмы размещения можно классифицировать следующим образом: алгоритмы решения математических задач, являющихся моделями задач размещения; конструктивные алгоритмы; итера-

ционные алгоритмы улучшения начального размещения; непрерывно-дискретные алгоритмы. Тип используемого алгоритма зависит от решаемой задачи. Ниже кратко рассмотрены некоторые из алгоритмов.

Математические модели. В этих моделях элемент представляется в виде точки и исходящими из нее выводами (см. § 17.5).

Модель квадратичного назначения. В этой модели имеется фиксированный набор позиций, в которых могут быть размещены элементы. Степень связанности элементов, определяемая количеством связывающих их цепей, является весовым коэффициентом. Задача оптимизации может решаться непосредственно перебором всех возможных вариантов размещения элементов. Однако даже при малом числе позиций время решения на ЭВМ недопустимо велико. Реально, при решении задач размещения, часть элементов «закреплена» (не перемещается). Поэтому получается упрощенный набор вариантов размещения элементов (коммутационное поле) и время решения задачи уменьшается.

Модель ветвей и границ. Эта модель является модификацией предыдущей. Все множество допустимых решений разбивается на подмножества. Внутри последних осуществляется перебор решений с целью выбора оптимального. Если произвести выделение ряда подмножеств, найти для них минимальные значения целевой функции, то может оказаться, что значения целевой функции данных подмножеств больше наилучшего из ранее известных значений целевой функции. Тогда выделенные подмножества исключаются из дальнейшего рассмотрения. Это обеспечивает сокращение времени перебора.

Конструктивные алгоритмы. Исходными данными для размещения являются коммутационная схема, модели элементов и возможные места расположения элементов.

Алгоритмы последовательного размещения по связности. Если имеется n элементов и n возможных позиций для их размещения, то производится n -шаговый процесс принятия решения. На каждом шаге выбирается один из неразмещенных элементов и помещается в одну из незанятых позиций. Любой последовательный алгоритм размещения определяется правилами выбора очередного элемента и позиции для его установки.

В большинстве последовательных алгоритмов размещение и оптимизация сводятся к выбору на данном шаге оптимальной позиции некоторого элемента при неизменном положении ранее размещенных элементов.

Алгоритм обратного размещения является разновидностью предыдущего. В этом методе происходит предварительная оценка каждого из размещаемых элементов, каждой свободной позиции, и все элементы размещаются одновременно.

Итерационные алгоритмы. Алгоритмы размещения данного типа используют начальное размещение и некоторое подмножество допустимых размещений (см. § 17.4). Процесс вычислений заканчивается, как только модуль разности значений целевой функции для двух соседних итераций становится меньше заданного значения. Алгоритмы парных перестановок оперируют изменением мест двух элементов. Затем рассчитывается целевая функция. Если она меньше предыдущей, то расположение элементов фиксируется. Затем происходит перестановка двух других элементов и т. д. Алгоритм групповых перестановок использует циклические перестановки, суперпозиции парных перестановок и др. Такие перестановки осуществляются либо произвольным перемещением элементов, либо исходя из перестановок элементов, имеющих определенные свойства. Алгоритм случайного поиска является разновидностью предыдущего. Позиции элементов определяются с помощью программно реализованных датчиков случайных чисел, аппроксимирующих выбранную функцию распределения.

Рассмотренные алгоритмы предполагают фиксированные места расположения элементов и являются наиболее развитыми. Эти алгоритмы применимы для разработки топологии БИС, состоящей из функциональных ячеек заданного набора. Ячейки располагаются горизонтальными рядами. С помощью этих алгоритмов можно производить распределение ячеек по рядам и размещение рядов на кристалле, уменьшающее площадь кристалла и улучшающее электрические характеристики БИС. Если требуется разработать топологию самих ячеек или БИС состоит из различных узлов (ячеек, функциональных блоков), то эти алгоритмы оказываются неприменимыми и необходимо использовать непрерывно-дискретные методы размещения. Последние представляют большую сложность и менее разработаны.

Непрерывно-дискретные алгоритмы. Для них размещение элементов фактически осуществляется на непрерывной плоскости без фиксирования позиций. Процесс размещения обычно состоит из решения непрерывной задачи и преобразования ее к дискретному множеству позиций.

Алгоритм силовых функций основан на механической аналогии. Элементы, так же как и в предыдущих алгоритмах, считаются материальными точками (в усложненных моделях могут быть учтены геометрические размеры элементов.). На элементы действуют силы притяжения и силы отталкивания, соответственно пропорциональные и обратно пропорциональные расстояниям между элементами. Эти силы обеспечивают компоновку элементов и устраняют их слияние или наложение. Вводится также сила отталкивания элементов от границ кристалла, предотвращающая выход элементов за его границы. В некоторых случаях использу-

ется момент вращения, зависящий от количества и порядка расположения связей между элементами. Могут быть введены еще некоторые силы и моменты вращения. Для описания поведения системы составляют уравнения статистического равновесия системы материальных точек. Условием равновесия является равенство нулю сил и моментов, действующих на элементы. Использование алгоритма силовых функций при большом количестве элементов сопряжено со значительными трудностями при вычислении. Кроме того, коэффициенты пропорциональности, характеризующие законы взаимодействия, подбираются экспериментально.

Алгоритм последовательного сдвига предусматривает решение задачи размещения расчетом оптимальных положений каждого элемента при условии неподвижности других. Локальная оптимизация положений отдельных элементов приводит к монотонному уменьшению целевой функции. Процесс носит итерационный характер и заканчивается, когда модуль разности целевой функции двух последовательных итераций становится меньше заданного значения.

Одна из возможных структурных схем автоматизированного проектирования топологии МДП БИС представлена на рис. 17.6. Здесь предусмотрено разбиение схемы на функциональные блоки. В наибольшей степени поддается автоматизации этап проектирования топологии отдельных функциональных блоков.

Трассировка межэлементных соединений. Исходными данными при трассировке являются геометрические размеры элементов, данные по их размещению на кристалле, размер кристалла и перечень межэлементных соединений цепей. При трассировке необходимо также учитывать геометрические размеры соединительных шин, ограничения на число их пересечений, число слоев металлизации и др.

Алгоритмические методы трассировки можно разделить на два основных типа: топографические и графотеоретические. В первом — предпочтение отдается метрическому аспекту, во втором — проводится предварительный анализ планарности схем, представленной графовой моделью, с последующей ликвидацией пересечений технологическими приемами. Рассмотрим подробнее методы первого типа, более эффективные для разработки многослойных БИС.

Распределение межэлементных соединений по слоям называется расслоением. При расслоении соединений необходимо наиболее эффективно использовать площадь кристалла и минимизировать число слоев, количество межслойных переходов и др. Распределение соединений по слоям можно выполнять до, в процессе и после трассировки отдельных соединений.

Наибольшее распространение в настоящее время получила двуслойная металлизация. Как показывает анализ, наиболее эффективно предварительное расслоение, приводящее к лучшему использованию площади кристалла и уменьшению числа межслойных переходов. Расслоение до трассировки основано на

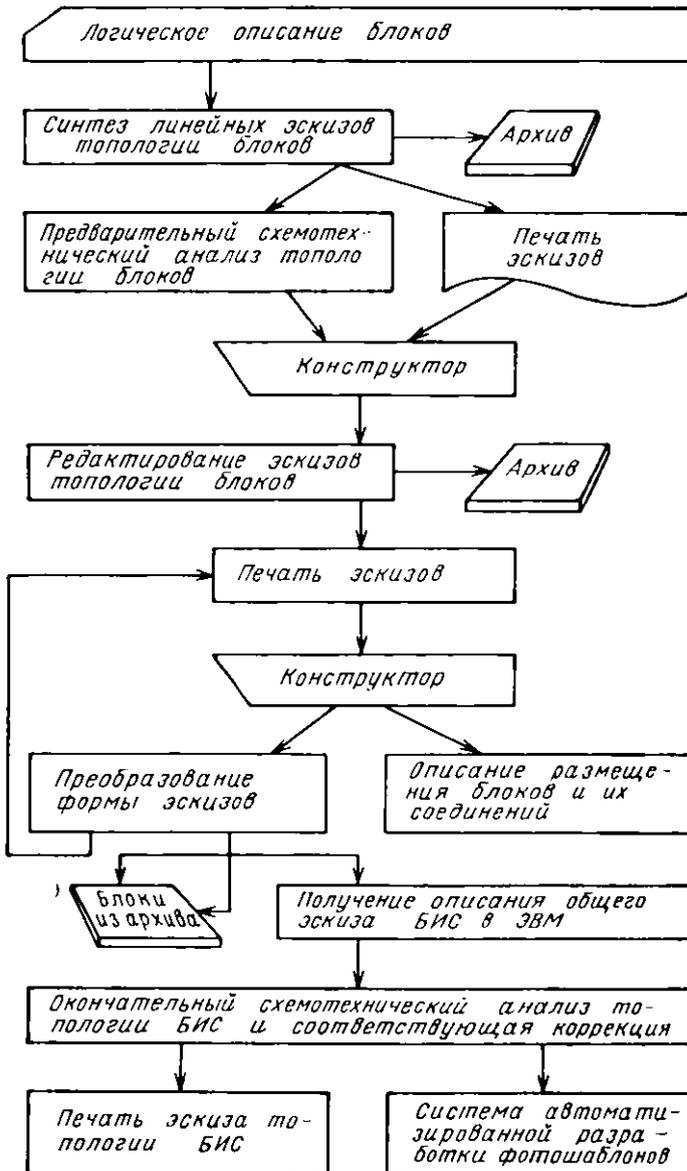


Рис. 17.6. Структурная схема одного из вариантов проектирования топологии МДП БИС

выявлении соединений или их групп, которые при однослойной металлизации неизбежно приведут к наличию пересечений, увеличению длины шпн и усложнению их формы. Наиболее простым способом расслоения является выделение некоторых преимущественных направлений, например вдоль координатных осей (X , Y), группирование шпн с одинаковой ориентацией и разнесение этих групп на отдельные слои. Существуют и другие более сложные методы группировки.

Имеется ряд алгоритмов трассировки. Рассмотрим лишь два из них: волновой алгоритм Ли и алгоритм топографического моделирования. Суть алгоритма Ли заключается в следующем. Кристалл разбивается на элементарные ячейки квадратной формы, количество которых определяется числом элементов, технологическими и конструктивными требованиями и ограничениями. Обычно сторона квадрата $c = a + b$, где a — расстояние между шинами металлизации; b — ширина последних. Процесс трассировки состоит из поиска пути и его проведения.

На рис. 17.7 представлен кристалл на 8×8 ячеек. Крестом помечены квадраты, через которые не может проходить шина. Необходимо провести трассу из ячейки A в ячейку B . Из ячейки A исходит числовая волна (квадрату A соответствует число 0), распространяющаяся до ячейки B (рис. 17.7,а). Если волна не может дойти до квадрата B , ввиду занятости ряда ячеек, то пути от A до B не существует. После того как путь проложен (числа 0—9, рис. 17.7,а), прокладывается трасса, имеющая наименьшую длину. Из рис. 17.7,б видно, что существуют два пути с одинаковой длиной (непрерывная и штриховая линии). Однако для сокращения количества изломов (штриховая линия имеет на один излом больше, чем непрерывная) вводится правило приоритета: возможность сохранения направления линии при переходе от ячейки $i-1$ к i такого же, как при переходе от i к $i+1$. Этот алгоритм требует $\log_2(n+2)$ бит памяти на одну ячейку, где n — длина пути от A к B . Сокращение объема памяти достигается, в частности, использованием нумерации ячеек в соответствии с последовательностью чисел 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, ... Этому случаю соответствует рис. 17.7,в. Указанная последовательность чисел определяет путь от A к B , показанный на рисунке штриховой линией. Возможное дублирование

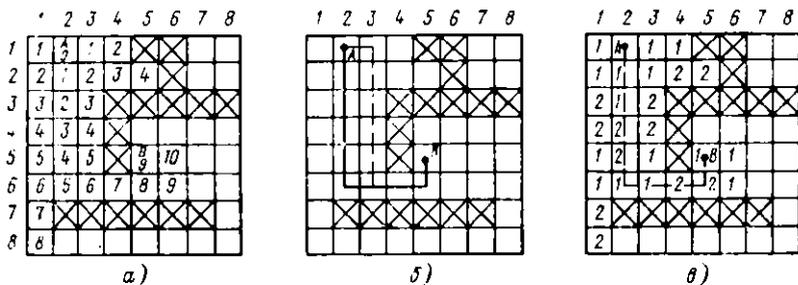


Рис. 17.7. Иллюстрации волнового алгоритма Ли (а), проложенной трассы (б) и его модификация (в)

путей одинаковой длины исключается соответствующими правилами приоритета. В данном типе алгоритма для каждой ячейки требуется всего два двоичных разряда памяти.

Рассмотренные варианты волновых алгоритмов могут быть использованы для трассировки однослойной металлизации при запрещении пересечений. Однако существуют их модификации, позволяющие осуществлять построение соединений в пространстве. Для этого используется набор слоев, связанных между собой переходами.

В алгоритме топографического моделирования кристалл также разбивается на ячейки и представляется в виде топографического рельефа. В начале всем клеткам присваивается нулевая высота. Затем характерным областям (границам кристалла, внешним и внутренним контактным площадкам и др.) по определенным законам приписываются численные значения высоты и моделируется рельеф, содержащий «вершины», «валы», «склоны», «равнины» и т. д. Когда исходный рельеф образован, производят прокладку трассы. Если прокладка закончена, то трасса обносится «валом», что заставляет последующие трассы обходить ее. Этот алгоритм дает возможность производить прокладку нескольких трасс одновременно из одной или сразу из обеих точек. Он не гарантирует нахождение пути (требуется вмешательство оператора), но обеспечивает равномерность расположения трасс.

Сочетание алгоритмов топографического моделирования и волнового на разных этапах трассировки имеет многочисленные модификации.

Проверка топологии. Виды проверки, необходимые на последнем этапе проектирования, делятся на три группы:

проверка геометрических параметров — обнаружение отклонений от правил проектирования, определяемых в основном технологическими процессами (минимальная ширина соединительных проводников, минимальное расстояние между ними и т. д.);

проверка межэлементных соединений — выявление дефектов и погрешностей в изготовлении схемных элементов, дефектов и погрешностей в соединениях; подтверждение правильности выполнения соединений;

проверка электрических характеристик для подтверждения того, что схема, реализованная в топологии, отвечает электрическим требованиям, предъявляемым к ней разработчиком.

Проверку геометрических параметров можно провести, проконтролировав только геометрические параметры рисунка маски. Проверка межэлементных соединений и электрических характеристик проводится в первую очередь анализом электрической схемы. При проверке соединений на основе графической информации восстанавливают логические или электрические схемы, а затем сопоставляют их с замыслом разработчика. При проверке электрических характеристик на основе графической информации необходимо определить величины паразитных сопротивлений и емкостей, зависящих от топологии.

Диалоговые автоматизированные рабочие места. По мере того, как продолжительность и стоимость разработки топологии быстро растут, первостепенное значение приобретают программы вери-

фикации топологии, выполняемые до генерации фотошаблонов. Контроль ведется по топологическим проектным нормам, нормам на электрические параметры и на соответствие справочной схеме соединений.

Несмотря на то что сложность БИС и СБИС практически исключает возможность составления всего комплекта документации вручную, такие методы остаются широко распространенными, а их возможности значительно увеличились благодаря внедрению новых графических систем проектирования. Рост числа подобных систем свидетельствует о больших достижениях в этой области. В то же время меняется и сам характер работы, выполняемой при помощи подобных систем, которые теперь выступают в роли периферийных устройств сложных систем автоматизированного проектирования и применяются, например, для комплектования библиотек базовых ячеек. И все же несмотря на постоянно возрастающую долю регулярных структур значительный объем работы по проектированию топологии до сих пор выполняется вручную. В чем причина такого положения? Основное преимущество ручных методов — это высокая плотность упаковки создаваемых схем и, что даже более важно, возможность использования площадей, оставшихся незаполненными после размещения узлов с регулярной структурой.

В качестве основного средства автоматизации выступают диалоговые системы, имеющие почти одинаковые средства программного обеспечения. К мини-ЭВМ подключаются периферийные устройства: графические дисплеи, диски и т. п.

Отличия между такими системами в основном состоят в особенностях их средств программного обеспечения, в том числе программ автоматизированного проектирования, структуры команд и т. д. К интерактивным системам предъявляются следующие требования: оператор должен давать указания, исходя из общей оценки ситуации; ЭВМ осуществляет управление потоками данных и работает с различного рода программами автоматического проектирования; указания оператора, противоречащие правилам проектирования не воспринимаются ЭВМ.

Система, построенная в соответствии с данными требованиями, является высокоуровневой диалоговой системой проектирования. В последней на экран выводятся данные об областях, в которых проектирование еще не закончено (не завершены размещение блоков и трассировка соединений); данные об областях с неоптимальными результатами проектирования (неверное размещение блоков приводит к излишне плотной компоновке, трассировка создает слишком большую задержку сигналов); указания по совершенствованию топологии. Эти данные существенно упрощают работу оператора.

В процессе проектирования желательно использовать высокофункциональные команды, с применением которых достаточно сложный процесс проектирования может быть реализован командами, позволяющими быстро переходить от функции автоматического проектирования к диалоговому режиму.

17.7. МАШИННАЯ РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ И ФОТОШАБЛОНОВ

В конструкторскую документацию (КД) входит полная информация о выпускаемой БИС, электрические, топологические и другие характеристики и параметры. Процесс выпуска КД условно можно разбить на две части: автоматизированный выпуск общей конструкторской документации на БИС и документации на кристалл. Эти части взаимосвязаны, так как вторая входит в состав первой. Однако они имеют и определенную специфику, которая будет рассмотрена ниже. Вторая часть тесно связана с автоматизированным изготовлением фотошаблонов, хотя и не включает его, некоторые аспекты которого также будут рассмотрены.

Автоматизированный выпуск общей конструкторской документации. Наиболее трудоемкими процессами являются вычерчивание функциональных и принципиальных схем, послойных чертежей топологии БИС или таблиц координат угловых точек, разбивка информации и ее размещение по страницам текста, трассировка соединительных линий в чертежах и др.

Автоматизация проектирования КД предусматривает решение ряда задач: формализация оценки качества документа; разработка языка и программ кодирования; автоматизированный синтез графических материалов и выпуск КД на устройствах вывода ЭВМ на стандартный бланк, снабженный координатной сеткой, с определенным числом позиций или зон для элементов схем, чертежей и др. Основные требования к КД — информативность и наглядность. Наиболее важными критериями оценки качества КД являются: минимальная суммарная длина соединительных линий между элементами; минимальное количество внешних связей между страницами (часто схемы, таблицы и прочее не удается расположить на одной странице и требуется их разбиение на несколько страниц); минимальное количество пересечений и изломов соединительных линий. Кроме того, следует стремиться к обеспечению равномерности заполнения и размещения элементов на странице и помещению функционально связанных групп элементов на одной странице.

Из приведенных соображений следует, что задачи автоматизированного выпуска КД перекликаются с задачами размещения

элементов и трассировки соединений, рассмотренными в § 17.6. Поэтому для автоматизации выпуска КД используются уже рассмотренные алгоритмы. Заметим, что задача автоматизированного выпуска общей документации с точки зрения языковых средств, устройств ввода, вывода, обработки и коррекции информации близка к задаче выпуска документации на кристалл. Последняя в настоящее время наиболее разработана, поэтому рассмотрим ее подробнее.

Автоматизированный выпуск конструктивной документации на кристалл и фотошаблонов. Проектирование каждой БИС завершается изготовлением документации на кристалл и фотошаблонов.

Конструкторская документация должна содержать описание послойных топологических чертежей. При выпуске микросхем малой и средней степени интеграции в КД обычно входят: послойные рисунки топологии и таблицы координат угловых точек (см. § 15.4). При разработке БИС такое представление КД затруднено вследствие значительного количества элементов (угловых точек). Наибольшее распространение получило языковое описание топологии. Информация о топологии в виде распечаток по объему в десятки раз меньше табличной.

На рис. 17.8 схематично представлена интерактивная система разработки документации на кристалл БИС и изготовления фотошаблонов, а на рис. 17.9 показана структурная схема изготовления фотошаблонов. Основой системы является мини-ЭВМ. Ввод в

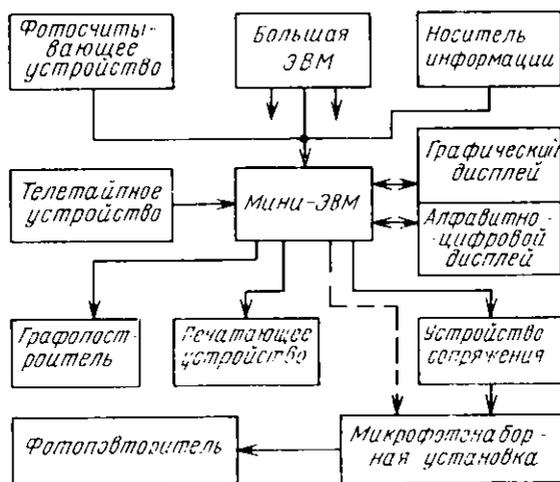


Рис. 17.8. Интерактивная система разработки документации на кристалл БИС

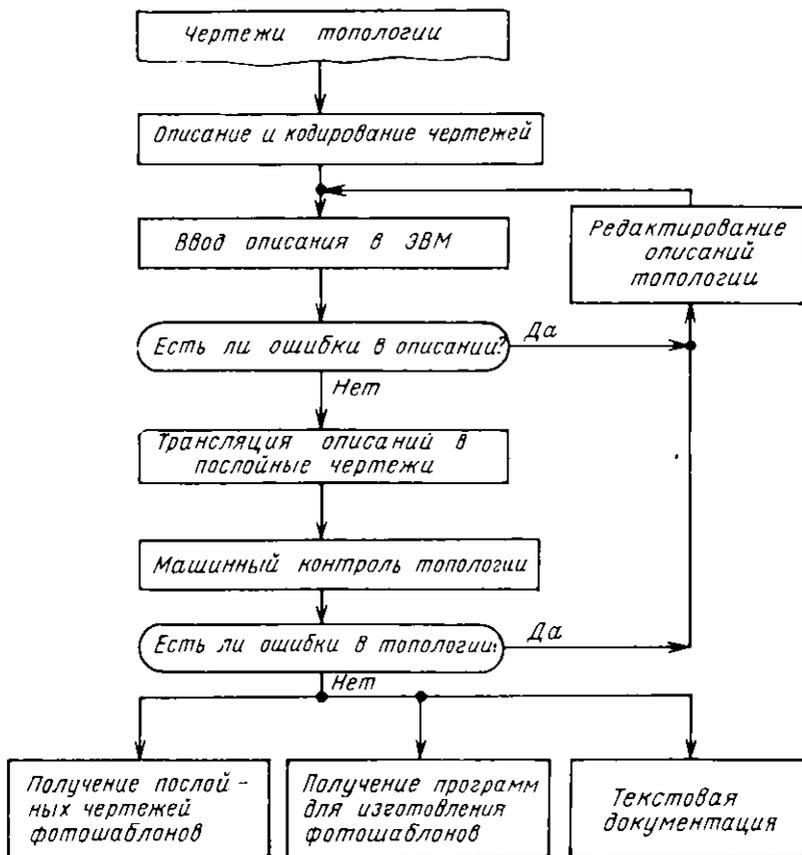


Рис. 17.9. Структурная схема автоматизированного процесса разработки фотошаблонов

нее информации об элементах и фрагментах топологии БИС может осуществляться различными способами в зависимости от решаемой задачи. Фотосчитывающее устройство преобразует входную графическую информацию о топологии слоев в цифровую информацию угловых точек считывателем координат. Существуют типы фотосчитывающих устройств, которые снабжают кодируемую информацию буквенными и цифровыми комментариями, что значительно сокращает ее объем по сравнению с покоординатным считыванием. Этот метод удобен, но требует детальной прорисовки топологии в большом масштабе (1 : 1000 или 1 : 3000), что вызывает необходимость вводить топологию фрагментами. Кроме того, за-

трудна полная автоматизация процесса. Введение графических данных с помощью языка их описания осуществляется блоком «Носитель информации». Языковый способ описания позволяет упростить кодирование, ликвидировать избыточность информации, обеспечивает удобство ее преобразования и контроля. Введение данных осуществляется перфолентами, магнитными лентами и др.

Рассматриваемая система может быть подсистемой общей системы проектирования топологии. Наиболее трудоемкие задачи по проектированию топологии элементов или фрагментов решаются на большой ЭВМ и передаются мини-ЭВМ по каналу связи. Одна большая ЭВМ может работать с несколькими мини-ЭВМ.

Телетайпное устройство, обслуживающее всю систему, осуществляет подготовительные работы, команды на выдачу слоя топологии, смену режимов оборудования системы и другие директивы. С его помощью можно также запросить данные о времени простоя системы и о сбоях работы оборудования.

Графические и алфавитно-цифровые дисплеи используются для проверки топологии и ее корректировки, обеспечивают интерактивный режим работы. Алфавитно-цифровой дисплей осуществляет оперативные изменения в описании топологии на входном языке с помощью клавиатуры дисплея. На графических дисплеях происходит отображение проектируемой топологии. Возможно изменение масштаба изображения и получение на экране сразу нескольких слоев. С помощью графического дисплея производится корректировка геометрических размеров элементов, стыковка фрагментов топологии, проверка совмещаемости слоев и др. Корректировка может осуществляться как световым пером, так и с помощью алфавитно-цифрового дисплея, на который вызывается информация об интересующем фрагменте. Информация выводится на графопроектор либо на печатающее устройство.

Графопроекторы бывают двух основных типов: рулонный и планшетный. Рулонный графопроектор используется для быстрых, но менее точных, по сравнению с планшетным, прорисовок. Планшетный графопроектор применяется для получения отлаженной топологии, для прорисовки совмещенных слоев, для их окончательного контроля и документирования.

Печатающее устройство осуществляет документирование результатов разработки топологии. Для схем малой и средней степени интеграции печатаются номера и координаты угловых точек. Для БИС приводится языковое описание топологии.

Устройство сопряжения производит языковое описание выходной информации, которая выводится на перфоленту, магнитную ленту или на какой-либо другой носитель. Языковое представление информации необходимо для получения фотошаблонов. По-

следние изготавливаются на микрофотонаборной установке и фотоповторителе (см. § 7.2). При соответствующем программном обеспечении возможно непосредственное согласование мини-ЭВМ с микрофотонаборной установкой, показанное на рис. 17.8 штриховой линией.

Примером отечественной интерактивной системы подготовки информации для изготовления фотошаблонов является система «Кулон». В системе предусмотрены два рабочих места, в каждое из которых входят: дисплей запоминающий графический (ГД); дисплей символьный (ДС); пульт контроля и управления (ПУ); малый кодировщик (МК); полуавтоматический кодировщик (ПК). Общими для обоих рабочих мест являются автоматический планшетный графопроектор (ГП) и электрическая пишущая машинка (ЭПМ).

Связь пользователя с системой осуществляется через ГД, ДС, ПУ и реализуется в виде диалога пользователя с системой; при контроле со стороны системы идет подсказка альтернативы действий пользователя.

При вводе топологии с ПК исходной информацией для системы является сборочный (или послойный) чертеж кристалла в соответствующем масштабе. При вводе с МК достаточно иметь эскиз топологии микросхем. Конечной целью работы пользователя на системе является формирование информации о топологии микросхемы на магнитной ленте, а в случае необходимости, вычерчивание этой топологии с помощью ГП.

Программно-аппаратные средства системы обеспечивают выполнение следующих функций: вход пользователя в систему; протоколирование работы операторов и выход пользователя из системы; ввод графической информации с топологического чертежа.

Рассмотренная система является универсальной и может использоваться не только для получения КД на кристалл, но и для автоматизированного выпуска общей КД.

Глава 18. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

18.1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОСХЕМ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Среди полупроводников по широте использования в микроэлектронике для создания микросхем кремний был и остается основным материалом. Вместе с тем в настоящее время начали интен-

сивно внедряться микросхемы на основе арсенида галлия. Арсенид-галлиевые микросхемы в силу высокой подвижности носителей заряда в GaAs имеют частотный диапазон функционирования, недостижимый для микросхем на основе кремния. Развитие арсенид-галлиевых микросхем связано в первую очередь с успехами в области получения эпитаксиальных пленок GaAs, в том числе гетероэпитаксиальных пленок типа GaAs—AlGaAs—GaAs. Высокие результаты были получены здесь при использовании метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Для транзисторов на GaAs разработано несколько основных базовых структур, конструктивно-технологические особенности которых связаны, с одной стороны, с использованием полуизолирующего GaAs в качестве подложки, с другой — многослойных гетероэпитаксиальных структур. При этом *p-n* переходы создаются в процессе эпитаксиального наращивания. Другой метод создания *p-n* переходов — ионное внедрение примесей. Для GaAs донорными примесями являются кремний, сера, селен, олово, теллур; акцепторными — бериллий, магний, цинк, кадмий.

Биполярные транзисторы. Арсенид-галлиевые биполярные транзисторы создаются на основе гетероэпитаксиальных структур. В двух основных вариантах транзисторных структур *p-n* переходы изготавливаются либо методом ионного внедрения, либо сочетанием ионного внедрения и эпитаксиальных процессов. Примером биполярного транзистора является структура с гетеропереходами и инвертированным эмиттером, представленная на рис. 18.1, которая может быть использована для построения нескольких типов логических микросхем, например элементов инжекционной логики или быстродействующей транзисторной логики. Исходным материалом для получения этой структуры является подложка из сильнолегированного GaAs *n*-типа. На подложку методом молекулярно-лучевой эпитаксии наращивается эмиттерный слой $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ *n*-типа с концентрацией примеси $(5 \dots 10) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Толщина области эмиттера около 1 мкм. Между областью эмитте-

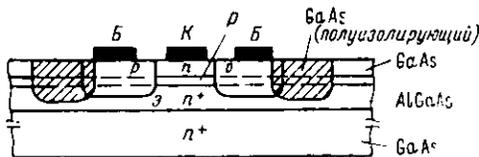


Рис. 18.1. Структура биполярного транзистора с инвертированным эмиттером

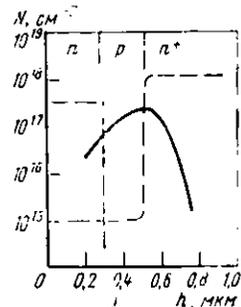


Рис. 18.2. Распределение концентрации легирующей примеси в биполярной структуре с ионным легированием базовой области

ра и областью базы создается переходный слой AlGaAs толщиной $(3 \dots 5) \cdot 10^2$ мкм, в котором постепенно уменьшается доля Al от 0,2 до 0. Тем самым создается плавный гетеропереход, обеспечивающий по сравнению с резким более высокие коэффициенты усиления по току. По отношению к GaAs соединение AlGaAs имеет более широкую запрещенную зону. Поэтому при изготовлении базы из GaAs повышается эффективность эмиттера, поскольку в этом случае потоку дырок из базы в эмиттер препятствует высокий энергетический барьер. Легирование GaAs-базы p -типа может проводиться либо в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, либо ионным внедрением акцепторной примеси после завершения формирования всей многослойной эпитаксиальной структуры, включая коллекторный слой.

Распределение концентрации легирующей примеси в таком транзисторе для случая пошного легирования базовой области представлено на рис. 18.2.

Технологические операции по изготовлению транзистора проводятся в следующей последовательности. Исходная многослойная гетероструктура GaAs n^+ -типа — Al_{0,2}Ga_{0,8}As n^+ -типа — GaAs (легированный) — GaAs n -типа легируется по всей поверхности ионным внедрением бериллия для создания базового слоя p -типа. Затем на поверхность наносится Si₃N₄. После процесса фотолитографии при использовании Si₃N₄ и фоторезиста в качестве защитной маски проводится локальное ионное внедрение Be для получения контактов к базовому слою (рис. 18.1). Отжиг радиационных дефектов проводится при $T=800 \dots 900$ С. Следующая операция направлена на формирование изолирующих областей, разделяющих области базы и коллектора. При этом области эмиттеров в соответствии со структурой указанных выше логических элементов являются общими для всех транзисторов. Изолирующие области формируются внедрением ионов бора, создающих радиационные нарушения, приводящие к появлению в GaAs в областях легирования полужолирующего материала. Омические контакты изготавливаются методом обратной (взрывной) литографии (§ 9.4). Для контактов к областям n -типа используется металлическая композиция Au—Ge—Ni, к областям p -типа — Au—Zn. При необходимости создания барьеров Шотки используется металлическая композиция Ti—Pt—Au.

Арсенид-галлиевые полевые транзисторы с затвором Шотки (GaAs ПТШ). Структура ПТШ представлена на рис. 18.3. Прибор создается на полужолирующей подложке GaAs, к параметрам которой предъявляется ряд требований: термостойкость (сохранение высокого удельного сопротивления при термических отжигах радиационных дефектов при ионной имплантации примесей и эпитаксиальном наращивании); минимальные концентрация примесей

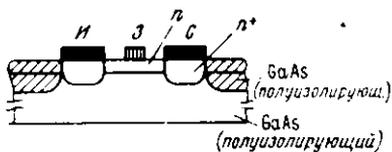


Рис. 18.3. Структура полевого транзистора с затвором Шотки в микросхеме

и плотность дефектов. На поверхности подложки ионным внедрением создается активный слой. Поскольку в соответствии с принципом функционирования прибора активный слой полностью обедняется при подаче смещения на затвор, должна существовать взаимосвязь между уровнем легирования активного слоя n -типа и его толщиной (например, при концентрации примеси $1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при подаче напряжения 3 В перекрывается слой толщиной 0,2 мкм).

Иногда между подложкой и активным слоем вводится высокоомный буферный слой толщиной несколько микрометров, назначение которого состоит в повышении качества границы раздела подложка — активный слой и подвижности носителей заряда. Буферный слой создается методами эпитаксиального наращивания. Поверхностное сопротивление активного слоя канала должно составлять 1500 ... 2000 Ом/□. Получение омических контактов к слоям с таким сопротивлением затруднительно, поэтому в целом необходим сложный профиль распределения донорной примеси: 1) локальные поверхностные области с высоким уровнем легирования (поверхностное сопротивление несколько сотен Ом/□) для получения контактов к истоку и стоку (создаются ионным внедрением в областях контактов); 2) слой со сниженной концентрацией примеси (активный n -слой в области затвора). Далее после локального легирования контактных областей и отжига радиационных дефектов формируются изолирующие области локальной ионной имплантацией бора. Для омических контактов и затвора Шотки могут быть использованы металлические композиции, указанные выше для биполярных микросхем.

Важным моментом в конструктивно-технологической разработке ИТШ является уменьшение сопротивления исток — канал для повышения крутизны транзистора. Снижение этого сопротивления достигается уменьшением контактного сопротивления металл — полупроводник, распространением n^+ -областей за пределы областей металлического контакта таким образом, чтобы расстояние между контактными областями n -типа равнялось примерно трем длинам затвора. Существенного снижения сопротивления исток — канал можно достигнуть, используя технологический прием самосовмещения (см. § 8.3). В этом случае контактные n^+ -области создаются после изготовления затвора Шотки, материал которого является маской при локальном ионном внедрении доноров. Оче-

видно, что для структуры с самосовмещением необходимы такие материалы для затвора Шотки, которые были бы термостабильны при температурах отжига радиационных дефектов. Такими материалами могут быть тантал, силициды вольфрама, например W_5Si_3 или силициды типа TiW_xSi_y .

Как для биполярных, так и для МДП-микросхем при необходимости получения двухуровневой электрической разводки проводится технологическая операция нанесения межуровневого диэлектрика, например слоя полиимида.

18.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С ЗАТВОРОМ ШОТКИ

Полевые транзисторы с затвором Шотки на GaAs являются одним из основных активных элементов сверхбыстродействующих микросхем. Их превосходство над кремниевыми приборами связано с большей подвижностью электронов (см. рис. 11.5) и более высокой скоростью насыщения в сильных полях.

Принцип работы ПТШ поясним с помощью рис. 18.4,а. Основанием ПТШ служит полупроводящий GaAs ($\rho \approx 10^8$ Ом·см). Электроды стока и истока образуют омические контакты с эпитаксиальной пленкой за счет сплавления, например, сплава Ge—Au. Структура, показанная на рисунке (электрод затвора пока не принимается в расчет), представляет собой резистор; ток, протекающий через него,

$$I = qn_k h_k ZV, \quad (18.1)$$

где h_k и n_k — толщина и концентрация электронов в эпитаксиальной пленке (канале); Z — ширина контакта и $V = \mu_n E$ — дрейфовая скорость электронов (μ_n — подвижность электронов в слабом поле, а E — напряженность электрического поля в канале). При увеличении E в таком резисторе наблюдается насыщение скорости дрейфа и, следовательно, тока I . Скорость электронов в кана-

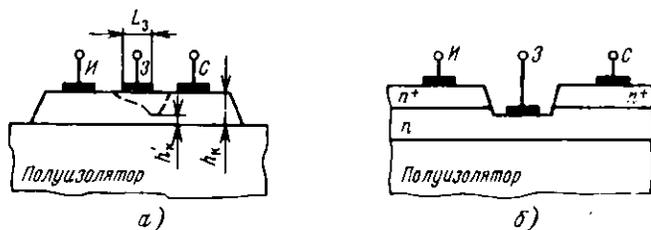


Рис. 18.4. Транзистор с затвором Шотки с простой структурой (а) и ПТШ с уменьшенным сопротивлением пассивных областей (б)

де ограничена величиной V_{\max} при достижении напряженности электрического поля значения $E_{\text{н}} = V_{\max}/\mu_{\text{н}}$.

Электрод затвора (см. рис. 18.4,а) образует с эпитаксиальной пленкой контакт (диод) Шоттки (металлами контактов могут быть Al, W и другие или двухслойные структуры, например, Ti и Au). Меняя напряжение на затворе, мы меняем толщину слоя пространственного заряда контакта Шоттки (штриховая линия на рис. 18.4,а) и, следовательно, толщину области канала и его сопротивление. Величина h'_k определяет минимальную толщину канала (под краем затвора, ближайшего к истоку). Выходная ВАХ ПТШ содержит как крутую, так и пологую области и имеет вид, напоминающий характеристики МДП-транзистора (см. рис. 14.4). Таким образом, ПТШ является резистором с переменным сопротивлением, ток которого управляется напряжением на затворе. Толщина канала h_k составляет доли, а длина L — единицы микрометров и менее. Значение $n_k = (4 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}) \text{ см}^{-3}$. Структура ПТШ на рис. 18.4,б обладает меньшим сопротивлением пассивных областей.

Величина

$$V_{\max} = \begin{cases} V_{\max 0} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ см/с при } L > 1 \text{ мкм;} \\ V_{\max 0} (1 + L_0^2/L^2) \text{ при } 0,2 \leq L \leq 1,0 \text{ мкм,} \end{cases} \quad (18.2)$$

где $L_0 = 0,27 \text{ мкм}$.

Управление током стока может осуществляться как при отрицательных, так и при положительных напряжениях на затворе за счет изменения объемного заряда контакта Шоттки. В зависимости от наличия или отсутствия канала при нулевом потенциале на затворе транзисторы подразделяются на нормально открытые или нормально закрытые.

Пороговым напряжением транзистора ($U_{\text{пор}}$) называется напряжение на затворе, при котором исчезает или появляется канал. Оно положительно для нормально закрытых транзисторов и отрицательно для нормально открытых.

При положительных напряжениях на затворе транзистора объемный заряд под затвором уменьшается и ток стока увеличивается. При повышении напряжения на затворе возможно отпирание контакта Шоттки и появление затворных токов. Это объясняет то, что ВАХ транзистора иногда выходят не из начала координат.

Эффективное управление током стока транзистора с помощью напряжения на затворе ($U_{\text{з max}}$) прекращается, когда затворный ток становится сравним с током стока, поскольку дальнейшее приращение напряжения на затворе падает не на объемном заряде, а на пассивных областях и омических контактах. Можно считать, что $U_{\text{з max}}$ соответствует напряжению, при котором начинает от-

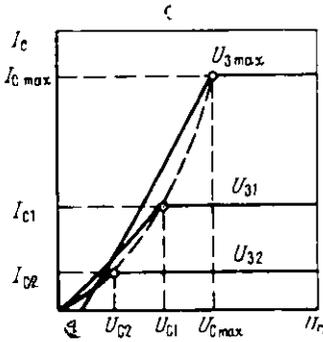


Рис. 18.5. Кусочно-линейная аппроксимация ВАХ ПТШ

пираться ДШ. Обозначим соответствующий ток стока $I_{c \max}$, а напряжение $U_{c \max}$ (рис. 18.5).

Для анализа микросхем, в которых используются ПТШ, как правило, может быть использована кусочно-линейная аппроксимация ВАХ, показанная на рис. 18.5. У диодов Шотки на основе GaAs обычно полагают, что высота потенциального барьера в полупроводнике $\phi_n = 0,70 \dots 0,85$ В (см. § 12.6), а напряжение ДШ в открытом состоянии при обычно используемой аппроксимации ВАХ ДШ $U_{3m}^* = 0,5$ В (рис. 18.6,а). С учетом этого выходная ВАХ ПТШ выходит не из начала координат, если

$$U_3 - U_{3m}^* > 0,5 \text{ В.}$$

На рис. 18.5 это условие выполняется для кривой при $U_3 = U_{3 \max}$ ($U_{3 \max} - U_{3m}^* \leq 0,5$ В). Из рисунка видно, что ВАХ ПТШ полностью определена, если в качестве параметра берется, например, ток стока I_c и известны зависимости от последнего напряжений U_c и U_3 .

Для получения аналитических выражений, определяющих характерные точки выходных ВАХ ПТШ (см. рис. 18.5), будем использовать ПТШ со структурой, показанной на рис. 18.4,а.

Максимальный ток стока (ток насыщения), который может протекать в рассматриваемой структуре при отсутствии слоя пространственного заряда контакта Шотки, получим с учетом (18.1):

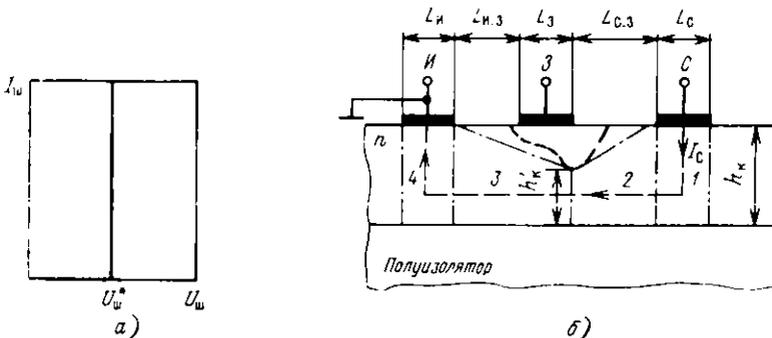


Рис. 18.6. Аппроксимация ВАХ контакта Шотки (а) и структура, используемая для анализа выходных ВАХ ПТШ (б)

$$I_n = qn_k h_k ZV_{\max}. \quad (18.3)$$

Для расчета реальных I_c , U_c и U_3 будем использовать рис. 18.6,б (штриховой линией показаны границы слоя пространственного заряда контакта Шотки). Как уже говорилось, ПТШ — резистор с переменным сопротивлением. Для нахождения его сопротивления воспользуемся подходом, рассмотренным в § 12.1, 12.2 (будем аппроксимировать путь прохождения тока стока областями, показанными на рис. 12.2). Как видно из рис. 18.6,б (штрихпунктирные линии), области 1, 4 — прямоугольные параллелепипеды, а 2, 3 — прямые трапециевидальные призмы.

Как следует из соотношений (18.1), (18.3), изменение I_c определяется только изменением h'_k (на границе областей 2 и 3 $E = E_n$, $V = V_{\max}$ и при $h'_k = h_k$ ток $I_c = I_n$). Это означает, что

$$I_c = a I_n, \quad (18.4)$$

где $a = h'_k/h_k$. Величина

$$U_c = I_c (R_1 + R_2 + R_3 + R_4), \quad (18.5)$$

где R_1, R_2, R_3, R_4 — сопротивления соответствующих областей, показанных на рис. 18.6,б. Сопротивления омических контактов исток — канал R_4 и сток — канал R_1 находятся из (16.23) в предположении, что длина омического контакта $L \geq (2,0 \dots 2,5) \sqrt{h_k m}$, а $m = \rho_n/\rho_k$, где ρ_n — переходное сопротивление контакта и $\rho_k = (qn_k \mu_n)^{-1}$ — удельное сопротивление канала. При одинаковой длине омических контактов к истоку и стоку

$$R_1 = R_4 = \rho_k \sqrt{h_k m} l(h_k, Z). \quad (18.6)$$

Сопротивления R_2, R_3 с учетом (12.36) находим по формулам

$$R_2 = \frac{\rho_n L_{c.3}}{Z h_k (1-a)} \ln \frac{1}{a}; \quad R_3 = \frac{\rho_n (L_{c.3} + L_{n.3})}{Z h_k (1-a)} \ln \frac{1}{a}.$$

Тогда из (18.5)

$$U_c = \frac{a I_n \rho_n}{Z h_k} \left(2 \sqrt{m h_k} + \frac{L_{c.3} + L_{n.3} + L_3}{1-a} \ln \frac{1}{a} \right). \quad (18.7)$$

Напряжение на затворе U_3 , обеспечивающее заданный ток I_c и соответствующее U_c , определится следующим образом:

$$U_3 = U_k + U_{3,k}. \quad (18.8)$$

Здесь U_k — потенциал канала в точке, где толщина канала равна h'_k ; и $U_{3,k}$ — напряжение затвор — канал, обеспечивающее максимальную толщину слоя пространственного заряда. Величина

$$U_k = I_c (R_3 + R_4). \quad (18.9a)$$

Подставляя в (18.9а) выражения, определяющие R_3 и R_4 , получим

$$U_K = \frac{a I_n \rho_K}{Z h_K} \left(\sqrt{m h_K} + \frac{L_{и.з} + L_3}{1-a} \ln \frac{1}{a} \right). \quad (18.9б)$$

Из (12.47), пренебрегая φ_T , имеем

$$U_{3.к} = \varphi_n - h_K^2 (1-a)^2 \frac{q n_K}{2 \epsilon_{и} \epsilon_0}. \quad (18.10)$$

Используя (18.10), при $a=0$ получим пороговое напряжение

$$U_{пор} = \varphi_n - h_K^2 \frac{q n_K}{2 \epsilon_{и} \epsilon_0}. \quad (18.11)$$

Напряжение на стоке при $I_C=0$

$$U_{C0} = \begin{cases} 0 & \text{при } U_3^* \leq U_{ш}^*, \\ U_3 - U_{ш}^* & \text{при } U_3 > U_{ш}^*. \end{cases} \quad (18.12)$$

Зависимость крутизны ПТШ на пологом участке ВАХ (см. § 14.2) от тока стока получим из (18.9), (18.10):

$$S = \left\{ \frac{\rho_K}{Z h_K} \left[1 - \sqrt{m h_K} - \frac{L_{и.з} + L_3}{1-a} \left(\frac{\ln a}{1-a} + 1 \right) \right] + \frac{q h_K^2 n_K}{\epsilon_{и} \epsilon_0 I_n} (1-a) \right\}^{-1} \quad (18.13)$$

а среднее сопротивление на крутом участке ВАХ (см. рис. 18.5)

$$\bar{R}_i = (U_C - U_{C0}) / I_C. \quad (18.14)$$

Соотношения (18.3) — (18.12) позволяют определить выходные ВАХ ПТШ.

Быстродействие ПТШ определяется аналогично быстродействию МДП-транзистора (см. § 14.2). Однако большая подвижность электронов и меньшее сопротивление каналов обеспечивают пико-секундные задержки и постоянные времена в ПТШ, что намного превосходит соответствующие характеристики МДП-транзисторов.

Пример. Рассчитать характеристические точки выходной ВАХ ПТШ при ее кусочно-линейной аппроксимации. Примем: $n_K = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $h_K = 0,35 \text{ мкм}$, $L_3 = L_{и.з} = L_{с.з} = 1 \text{ мкм}$, $a = 400 \text{ мкм}$, $\rho_n = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. При $U_{ш}^* = 0,5 \text{ В}$ и $\varphi_n = 0,8 \text{ В}$ из рис. 11.5 получим $I_n = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Используя соотношения (18.3) — (18.11), получаем выходные ВАХ ПТШ, представленные на рис. 18.7.

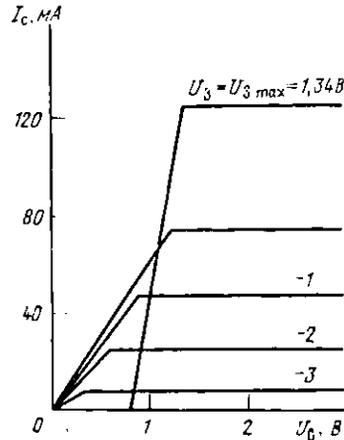


рис. 18.7. Выходные ВАХ ПТШ

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1. Минимальные значения геометрических параметров элементов полупроводниковых микросхем (обозначения приведены на рис. 12.1,а)

| Параметр | Значение, мкм |
|---|-----------------------|
| Погрешность изготовления линейных размеров | 0,3...0,5 |
| Систематическое увеличение линейных размеров (растворение окисной пленки) | 0,6...0,9 |
| Размер контактных площадок | 75×75 |
| Ширина металлизированных дорожек и расстояние между ними | 5...10 |
| Расстояние от границы кристалла до металлизации или диффузионной области | 100...200 |
| Расстояние от окна под разделительную диффузию до окна под базовую диффузию и контакт к коллектору <i>a</i> | 10...12 |
| Размер контактного окна <i>f, e</i> | 3...4 |
| Расстояние между границами окна под диффузию эмиттера и под контакт к последнему <i>g</i> | 4...5 |
| Расстояние между границами окон под базовую диффузию и под контакт к базовой области <i>d</i> | 3...4 |
| Расстояние между окнами под базовую и эмиттерную диффузию <i>m</i> | 4...5 |
| Расстояние между окном под эмиттерную диффузию и контактным окном к базовой области <i>q</i> | 4...5 |
| Расстояние между окнами под контакт к коллектору и под базовую диффузию <i>b</i> | 7...10 |
| Расстояние между границами окон под диффузию коллекторного контакта и под контакт к коллектору <i>c</i> | 3...4 |
| Перекрытие контактного окна металлизацией | 2...3 |
| Ширина окна под изолирующую диффузию | $\lambda_{\text{эл}}$ |

Примечание: Эти значения ориентировочны, так как с развитием технологии изготовления микросхем они уменьшаются.

Таблица П2. Минимальные значения геометрических параметров гибридных микросхем

| Параметр | Значение, мкм | | |
|--|---------------|-----|-----|
| | Ф | М | Т |
| Погрешность линейных размеров элементов и расстояние между ними при их расположении в одном слое | 10 | 10 | 100 |
| Расстояние между элементами, расположенными в одном слое | 100 | 300 | 300 |
| Перекрытие элементов, расположенных в разных слоях | 100 | 200 | 200 |
| Расстояние между элементами, расположенными в разных слоях | 100 | 200 | 400 |
| Расстояние от элементов до края подложки | 200 | 500 | 100 |
| Ширина резистора | 100 | 100 | 600 |
| Длина резистора | 100 | 300 | 600 |

| Параметр | значение, мкм | | |
|---|---------------|---------|---------|
| | Ф | М | Т |
| В конденсаторе расстояние между: | | | |
| краями верхней и нижней обкладок | 200 | 200 | 200 |
| краями диэлектрика и краями обкладок | 100 | 200 | 200 |
| краями диэлектрика и местами соединения | 300 | 300 | 400 |
| выводов обкладок с другими элементами | | | |
| Шарниры пленочных проводников | 50 | 100 | 200 |
| Расстояние от проволочного проводника или проволочного вывода до краев контактной площадки или до пленочного проводника, не защищенного изоляцией | 200 | 200 | 200 |
| Размеры контактных площадок | 100×150 | 100×150 | 400×400 |
| Размеры контактных площадок для контроля электрических параметров элементов | 200×200 | 200×200 | 400×400 |
| Расстояние от края компонента до края: | | | |
| подложки | 400 | 400 | 1000 |
| другого компонента | 600 | 600 | 1000 |
| элемента | 400 | 400 | 1000 |
| контактной площадки | 400 | 400 | 900 |
| Длина гибкого вывода навесного активного компонента без дополнительного крепления | 3000 | 3000 | 3000 |

Примечание. Эти значения ориентировочны, так как с развитием технологии изготовления микросхем они уменьшаются; Ф и М — фотолитографическая и масочная технологии изготовления тонкопленочных микросхем, Т — толстопленочная технология.

Таблица П3. Корпуса микросхем

| Условное обозначение | Основная характеристика | Масса, г, пол., ложко. г | Размеры, мм | | Число выводов |
|----------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|---------------|
| | | | Корпуса | Положки или крышки | |
| 1202.14 | Прямоугольный металло-стеклянный | 4,5 | 19,5×14,5×(4-5) | 16×8 | 14 |
| 1203.15 | То же | 4,5 | 19,0×14,5×(3-5) | 16×8 | 15 |
| 1211.15 | » | 7,0 | 22,0×19,5×5 | 17×15 | 15 |
| 211.15 | » | 12,0 | 29,5×19,5×5 | 22×17 | 15 |
| 303.36 | » | 12,0 | 29×19×3,6 | 26×16 | 36 |
| 209.29 | » | 17,0 | 39×29×5 | 34×20 | 29 |
| 123.14 | Прямоугольный соевый пластмас | 1,0 | 19×7,2×3,2 | 5×3 | 14 |
| 102.14 | То же | 1,2 | 19×7,2×3,2 | 5×3 | 16 |
| 103.16 | » | | | 5×3 | |
| 135.24 | Прямоугольный рамический металлоче | 3,4 | 29×14,5×4 | 4×4 | 24 |
| 204.48 | Прямоугольный керамический | 5,0 | 31×16,5×4 | 8×8 | 48 |

| Условное обозначение | Основная характеристика | Масса с подложкой, г | Размеры, мм | | Число выводов |
|----------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------|------------------------|---------------|
| | | | Корпуса | Подложки или кристалла | |
| 3101.08 | Круглый металлостеклянный | 1,5 | $D=9,5$ $H=4,6$ | 3×3 | 8 |
| 3103.12 | То же | 1,5 | $D=9,5$ $H=4,6$ | 3×3 | 12 |
| 4104.14 | Прямоугольный металлостеклянный | 1,0 | $10 \times 6,6 \times 2,2$ | $4,9 \times 2$ | 14 |
| 4110.16 | » | 1,0 | $12,0 \times 9,5 \times 2,5$ | $5,5 \times 3,5$ | 16 |
| 4116.24 | Прямоугольный металлостеклянный | 1,6 | $19,5 \times 12 \times 2,6$ | $7,5 \times 5$ | 24 |
| 4132.40 | Прямоугольный металлостеклянный | 6,0 | $35,5 \times 23,5 \times 4,5$ | 24×15 | 40 |
| 4136.48 | Прямоугольный керамический | 12,0 | $36 \times 24 \times 5$ | 30×15 | 48 |
| 4137.50 | » | 12,0 | $36,5 \times 24,5 \times 5$ | 30×15 | 50 |
| 4140.64 | Прямоугольный металлостеклянный | 20,0 | $54,5 \times 38,5 \times 5$ | 30×24 | 64 |

Примечание: D и H — внешний диаметр и высота корпуса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов/Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев и др.; Под ред. Л. А. Коледова. — М.: Высшая школа, 1984. — 231 с.
2. Матсон Э. А., Крыжановский Д. В. Справочное пособие по конструированию микросхем. — М.: Вища школа, 1982. — 224 с.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Сов. радио, 1980. — 424 с.
4. А. И. Курносоев, В. В. Юдин. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1986. — 367 с.
5. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Пошаговая плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986. — 230 с.
6. Валиев К. А., Раков А. В. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике. — М.: Радио и связь, 1984. — 349 с.
7. Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. Н. Плазмохимическое и ионно-плазменное травление микроструктур. — М.: Радио и связь, 1983. — 125 с.
8. Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. — М.: Металлургия, 1979. — 408 с.
9. Технология СБИС: В 2-х кн./Под ред. С. Зи. Пер. с англ. под ред. Ю. Д. Чистякова. — М.: Мир, 1986. — Кн. 1. — 404 с., кн. 2 — 453 с.
10. Сугано Т., Икома Т., Такэиси Е. Введение в микроэлектронику: Пер. с яп./Под ред. В. Г. Ржанова. — М.: Мир, 1988. — 319 с.
11. Арсенид галлия в микроэлектронике/Под ред. Н. Айсирука, У. Уиссмана. Пер. с англ. под ред. В. Н. Мордковича. — М.: Мир, 1988. — 554 с.
12. Полевые транзисторы на арсениде галлия. Принципы работы и технология изготовления/Под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Канделуола. Пер. с англ. под ред. Г. В. Петрова. — М.: Радио и связь, 1988. — 489 с.

13. Тилл У., Лаксон Дж. Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление: Пер. с англ./ Под ред. М. В. Гальперина. — М.: Мир, 1985. — 504 с.
14. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х книгах. — 2-е изд., перераб. и доп.; Пер. с англ./Под ред. Р. А. Суриса. — М.: Мир, 1984. — Кн. 1. 456 с, кн. 2. — 456 с.
15. Ефимов И. Е., Козырь И. Я., Горбунов Ю. И. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника. Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1987. — 416 с.
16. Пономарев М. Ф. Конструкции, расчет микросхем и микроэлементов ЭВА: Учебник для вузов. — М.: Радио и связь, 1982. — 288 с.
17. Селютин В. А. Автоматизированное проектирование топологии БИС. — М.: Радио и связь, 1983. — 112 с.
18. Проектирование СБИС/Ватанабэ М., Асада К., Кани К., Оцуки Т.; Пер. с яп. под ред. Л. В. Поспелова. — М.: Мир, 1988. — 304 с.
19. Аваев Н. А., Наумов Ю. Е. Элементы сверхбольших интегральных схем. — М.: Радио и связь, 1986. — 168 с.
20. Першенков В. С., Попов В. Д., Шальнов А. В. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 256 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1. СТРУКТУРА ЭЛЕМЕНТОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА КРЕМНИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 5 |
| 1.1. Введение | 5 |
| 1.2. Типовой технологический процесс изготовления кремниевых микросхем | 7 |
| 1.3. Особенности технологии интегральных микросхем | 9 |
| Глава 2. ОБРАБОТКА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖЕК | 11 |
| 2.1. Введение | 11 |
| 2.2. Ориентирование слитков полупроводников | 12 |
| 2.3. Механическая обработка кремния | 14 |
| 2.4. Очистка поверхности кремния | 18 |
| 2.5. Травление кремния | 21 |
| Глава 3. ДИФФУЗИЯ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ | 24 |
| 3.1. Введение | 24 |
| 3.2. Решение уравнения диффузии | 26 |
| 3.3. Характеристики диффузантов | 29 |
| 3.4. Практические способы проведения диффузии | 33 |
| 3.5. Методы изучения характеристик диффузионных слоев | 35 |
| Глава 4. ИОННОЕ ВНЕДРЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИИ | 37 |
| 4.1. Введение | 37 |
| 4.2. Распределение примеси при ионном внедрении | 39 |
| 4.3. Радиационные эффекты и их влияние на свойства легированных слоев | 41 |
| 4.4. Практические способы проведения процесса ионного внедрения | 43 |
| Глава 5. ЭПИТАКСИАЛЬНОЕ НАРАЩИВАНИЕ СЛОЕВ КРЕМНИЯ | 47 |
| 5.1. Введение | 47 |
| 5.2. Хлоридный и силановый методы автоэпитаксии кремния | 49 |
| 5.3. Молекулярно-лучевая эпитаксия | 57 |
| 5.4. Гетероэпитаксия кремния на сапфире | 60 |
| 5.5. Методы изучения характеристик эпитаксиальных слоев | 61 |
| Глава 6. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ТОНКИХ ПЛЕНОК | 63 |
| 6.1. Введение | 63 |
| 6.2. Получение пленок двуокиси кремния методом термического окисления кремния | 64 |
| 6.3. Вакуумное термическое напыление | 70 |
| 6.4. Ионно-плазменное напыление | 75 |
| 6.5. Осаждение тонких пленок из парогазовых смесей | 83 |
| 6.6. Методы определения толщины пленок | 83 |
| 6.7. Ионно-плазменные и плазмохимические методы обработки тонких пленок | 91 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Глава 7. | ЛИТОГРАФИЯ | 97 |
| 7.1. | Введение | 97 |
| 7.2. | Фотолиитография | 98 |
| 7.3. | Электроннолитография | 108 |
| 7.4. | Рентгенолучевая и ионная литографии | 112 |
| Глава 8. | ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРЕМ- НИЕВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 115 |
| 8.1. | Введение | 115 |
| 8.2. | Методы плавяния элементов в биполярных микросхемах | 116 |
| 8.3. | Технологические процессы изготовления биполярных интегральных схем | 122 |
| 8.4. | Технологические процессы изготовления микросхем на основе МОП- транзисторов | 127 |
| 8.5. | Получение электрической разводки и сборка кремниевых микросхем | 135 |
| Глава 9. | ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИБ- РИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 140 |
| 9.1. | Введение | 140 |
| 9.2. | Материалы подложек | 141 |
| 9.3. | Материалы пленок в тонкопленочных микросхемах | 143 |
| 9.4. | Получение рисунков в тонких пленках | 147 |
| 9.5. | Типовой технологический процесс изготовления тонкопленочных интег- ральных схем | 150 |
| 9.6. | Сборка гибридных микросхем | 151 |
| Глава 10. | ПРЕДМЕТ И ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ КОНСТРУИРО- ВАНИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 152 |
| 10.1. | Принципы конструирования интегральных микросхем | 152 |
| 10.2. | Типы интегральных микросхем, их элементы и компоненты | 154 |
| 10.3. | Задачи расчета параметров элементов | 156 |
| Глава 11. | ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРЫ ИНТЕ- ГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 161 |
| 11.1. | Рабочие слои интегральных микросхем | 161 |
| 11.2. | Удельная барьерная емкость $p-n$ переходов | 162 |
| 11.3. | Напряжение пробоя $p-n$ перехода | 166 |
| 11.4. | Удельное сопротивление слоев | 167 |
| 11.5. | Эффект оттеснения эмиттерного тока в базовом слое, ограниченном эмиттерным слоем (активной базовой области $n-p-n$ транзисторов) | 171 |
| 11.6. | Тепловые токи $p-n$ переходов | 174 |
| Глава 12. | ПРОЕКТИРОВАНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ И ДИ- ОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИ- КРОСХЕМ | 177 |
| 12.1. | Специфика интегральных $n-p-n$ транзисторов | 177 |
| 12.2. | Проектирование $n-p-n$ транзисторов | 184 |
| 12.3. | Расчет коэффициента передачи $n-p-n$ транзистора | 189 |
| 12.4. | Проектирование $p-n-p$ транзистора | 196 |
| 12.5. | Проектирование интегральных диодов на основе $p-n$ переходов | 201 |
| 12.6. | Проектирование диодов и транзисторов с барьером Шотки | 205 |
| 12.7. | Проектирование многоэмиттерных $n-p-n$ транзисторов | 211 |
| | | 319 |

| | | |
|-----------------------------|---|-----|
| Глава 13. | ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БИПОЛЯРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ | 211 |
| 13.1. | Проектирование диффузионных конденсаторов | 214 |
| 13.2. | Проектирование резисторов | 217 |
| Глава 14. | ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МДП-МИКРОСХЕМ | 225 |
| 14.1. | Проектирование МДП-конденсаторов | 225 |
| 14.2. | Проектирование МДП-транзисторов | 229 |
| 14.3. | Проектирование приборов с зарядовой связью | 233 |
| 14.4. | Проектирование межэлементных соединений | 237 |
| Глава 15. | КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 241 |
| 15.1. | Разработка топологии полупроводниковых интегральных микросхем | 241 |
| 15.2. | Разработка топологии цифровых интегральных микросхем на МДП-транзисторах | 245 |
| 15.3. | Особенности проектирования топологии аналоговых интегральных микросхем с дифференциальным каскадом на входе | 254 |
| 15.4. | Интегральная инжекционная логика | 256 |
| 15.5. | Конструктивное оформление интегральных микросхем | 257 |
| 15.6. | Документация на интегральные микросхемы | 260 |
| Глава 16. | КОНСТРУИРОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 2 |
| 16.1. | Проектирование пленочных элементов гибридных интегральных микросхем | 264 |
| 16.2. | Разработка топологии гибридных интегральных микросхем | 277 |
| Глава 17. | КОНСТРУИРОВАНИЕ БОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ | 279 |
| 17.1. | Особенности конструирования | 279 |
| 17.2. | Особенности структуры элементов | 281 |
| 17.3. | Задачи машинного конструирования | 284 |
| 17.4. | Физико-топологические модели элементов | 285 |
| 17.5. | Математические модели элементов | 289 |
| 17.6. | Машинная разработка топологии | 290 |
| 17.7. | Машинная разработка конструкторской документации и фотомаслонов | 301 |
| Глава 18. | ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ НА АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ | 305 |
| 18.1. | Технология изготовления элементов микросхем на арсениде галлия | 305 |
| 18.2. | Электрические и конструктивные параметры арсенид-галлиевых полевых транзисторов с затвором Шоттки | 309 |
| Приложение | | 314 |
| Список литературы | | 316 |