

А. С. Березин, О. Р. Мочалкина

ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Под редакцией

И. П. Степаненко

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального
образования СССР в качестве учебного пособия
для студентов высших технических учебных заведений*



МОСКВА «РАДИО И СВЯЗЬ» 1983

ББК 32.852
Б48
УДК 621.3.049.77

Березин А. С., Мочалкина О. Р.

Б48 Технология и конструирование интегральных микросхем: Учеб. пособие для вузов/Под ред.

И. П. Степаненко . — М.: Радио и связь, 1983. —

232 с., ил.

В пер.: 80 к.

Рассмотрены основные вопросы технологии и конструирования интегральных микросхем. Описаны процессы планарной технологии полупроводниковых ИС, технологические процессы производства пленочных ИС, методы проектирования элементной базы и конструирования ИС в целом, конструктивно-технологические особенности БИС.

Для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов. Может быть полезна широкому кругу специалистов, занимающихся созданием интегральных микросхем и радиоэлектронной аппаратуры на их основе.

2403000000—085
Б 046(01)—83 56—83

ББК 32.852

6Ф0.32

РЕЦЕНЗЕНТЫ: КАФЕДРА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И КОНСТРУИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КАЗАНСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА
(зав. каф. доктор техн. наук проф. Ю. П. ЕРМОЛАЕВ);
чл.-кор. АН БССР проф. В. А. ЛАБУНОВ

Редакция литературы по электронной технике

Предисловие

Данное учебное пособие является одной из трех книг по микроэлектронике, в которой получили дальнейшее развитие такие разделы, как «Технологические основы микроэлектроники» и «Элементы интегральных микросхем» [1]. Здесь изложены также вопросы практической реализации интегральных микросхем (ИС) после их схемотехнического проектирования [2].

В связи с быстрым развитием технологии и конструирования ИС, регулярным обновлением технологических приемов комплекс современных технологических и конструктивных методов создания ИС еще не нашел достаточно полного отражения в литературе и в первую очередь в учебных пособиях [3--27]. Наиболее полно конструктивно-технологические вопросы для гибридных ИС отражены в [3, 4]. Однако методы получения элементов с субмикронными размерами, ионно-плазменные и плазмохимические методы травления пленок освещены недостаточно полно (см. например, [4, 5]). Кроме того, не рассматриваются такие важные вопросы конструирования, как расчет геометрических размеров биполярных транзисторов в зависимости от их электрических характеристик и структурных особенностей; расчет коэффициента усиления транзистора с учетом эффектов сильного легирования эмиттерной области; оптимизация структуры и определение геометрических размеров диодов и транзисторов Шотки; анализ связи электрофизических характеристик полупроводниковой пластины и структуры МДП-транзисторов с их электрическими параметрами; оценка паразитного влияния шин металлизации и многослойной металлизации; особенности разработки топологии схем на МДП-транзисторах; специфика элементной базы больших интегральных схем (БИС) и особенности их проектирования с использованием ЭВМ.

Перечисленные выше вопросы, необходимые для практической реализации современных ИС и БИС, рассмотрены в данной книге.

Учебное пособие предназначено прежде всего для специальностей 0604, 0609, 0623, 0701, 0705. Оно рассчитано на студентов, знакомых с основами микроэлектроники. Однако ее могут использовать также инженеры, занимающиеся разработкой и производством ИС.

Главы 1—9 написаны О. Р. Мочалкиной, гл. 10—17 и приложение — А. С. Березиным, предисловие — совместно обоими авторами.

Авторы выражают искреннюю благодарность чл.-кор. АН БССР проф. В. А. Лабунову и проф. Ю. П. Ермолаеву за сделанные ими ценные замечания, направленные на улучшение книги.

Авторы признательны проф. И. П. Степаненко, взявшему на себя труд редактировать данное учебное пособие, а также коллективу кафедры микроэлектроники МИФИ за помощь в оформлении рукописи.

Глава 1

Основы планарной технологии

§ 1.1. Введение

Технология изготовления интегральных микросхем представляет собой совокупность механических, физических, химических способов обработки различных материалов (полупроводников, диэлектриков, металлов), в результате которой создается ИС.

Повышение производительности труда во всех областях народного хозяйства обусловлено в первую очередь совершенствованием технологии, внедрением прогрессивных технологических методов, стандартизацией технологического оборудования и оснастки, механизацией ручного труда на основе автоматизации технологических процессов. Значимость технологии в производстве полупроводниковых приборов и ИС особенно велика. Именно постоянное совершенствование технологии полупроводниковых приборов привело на определенном этапе ее развития к созданию ИС, а в дальнейшем — к широкому их производству.

Производство ИС началось примерно в 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*, позволивший создавать $p-n$ -переходы малых размеров и сложных конфигураций с помощью локальной диффузии. В 1959 г. на основе исследования поверхности полупроводников и методов стабилизации характеристик полупроводниковых приборов был разработан метод защиты $p-n$ -переходов от окружающей среды пленками двуокиси кремния.

Наряду с разработкой технологических методов развитие ИС включало исследования принципов работы их элементов, изобретение новых элементов, 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.

Быстрое развитие полупроводниковой электроники и отставание физико-химических исследований привели к тому, что технология полупроводниковых приборов и ИС в течение длительного времени носила эмпирический характер и до настоящего времени сохранился полуэмпирический подход к решению технологических задач. Несмотря на большие достижения микроэлектроники, глубокая теоретическая и экспериментальная проработка технологии и сейчас остается одним из основных вопросов в производстве ИС.

§ 1.2. Структура приборов и основные процессы планарной технологии

Методами 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 акценторной 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.

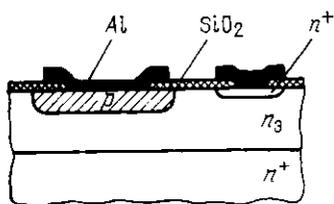


Рис. 1.1.

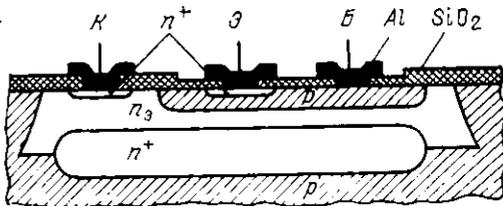


Рис. 1.2

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

Рис. 1.2. Структура транзистора в ИС с изоляцией элементов $p-n$ -переходом

В основном два свойства планарных $p-n$ -переходов обусловили возможность создания на их основе ИС. 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.

Интегральные микросхемы изготавливаются в сочетании с еще одним технологическим методом — методом *эпитаксиального наращивания* кремния. Структуры элементов основных типов кремневых ИС представлены на рис. 1.2—1.5.

3. Окисление пластин кремния для получения на поверхности пленки двуокиси кремния, маскирующей поверхность кремния при его локальном легировании.

4. Эпитаксиальное наращивание кремния на кремниевые или инородные (например, сапфировые) пластины.

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

6. Нанесение тонких металлических пленок на рабочую поверхность пластины для создания омических контактов к слоям, образующим структуры элементов ИС, и соединительных металлических полосок между элементами.

7. Фотолитография, проводимая с целью, во-первых, образования окон в пленке двуокиси кремния для проведения процессов локального легирования и, во-вторых, формирования металлических соединительных полосок.

8. Проверка параметров всех ИС, полученных на одной пластине, для отбраковки неработоспособных.

9. Разделение пластины на кристаллы и сборка годных ИС.

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

11. Окончательная проверка параметров ИС.

В течение технологического цикла изготовления ИС операции окисления, легирования и фотолитографии могут проводиться многократно. Их число зависит от типа ИС и структуры ее элементов.

Рассмотренные технологические операции входят в технологический процесс изготовления любой ИС. Для больших и сверхбольших интегральных микросхем (БИС и СБИС) разработана модифицированная планарная технология, получившая название *изопланарной*. Она включает дополнительные операции по получению рельефной поверхности на кремнии методом химического травления, нанесение на поверхность кремния пленки нитрида кремния, изготовление многоуровневой металлической разводки. При изготовлении БИС и СБИС для уменьшения размеров рисунков в пленке двуокиси кремния может применяться не фотолитография, а другие методы, основанные на использовании более коротковолнового излучения, — *рентгенолучевая литография* и *электронолитография*. Кроме того, для локального травления пленок двуокиси кремния и металлов начинают широко внедряться методы *ионно-плазменного травления* вместо обычного жидкостного травления в химических реактивах, что также способствует уменьшению размеров элементов.

§ 1.3. Особенности и преимущества планарной технологии

Особенностью планарной технологии является ее универсальность. Технологический процесс состоит из трех повторяющихся

операций (химическая обработка, термическая обработка и фотолитография). Самые разнообразные полупроводниковые приборы и ИС можно создавать изменением только комплекта фотошаблонов и режимов термических процессов.

Планарные $p-n$ -переходы защищаются от окружающей среды диэлектрической пленкой двуокиси кремния непосредственно в процессе их создания, и защитная пленка двуокиси кремния сохраняется на всех этапах дальнейшего формирования структуры элементов ИС. Эта особенность планарных $p-n$ -переходов обеспечивает высокую стабильность их параметров и надежность работы ИС.

Планарная технология характеризуется большим разнообразием геометрических конфигураций, высокой точностью взаимного расположения и линейных размеров $p-n$ -переходов. Минимальные линейные размеры областей в планарных структурах ИС составляют в настоящее время 1—3 мкм. Высокая стабилизация режимов при проведении термических процессов позволяет получить диффузионные слои толщиной до 0,1—0,2 мкм с разбросом $\pm 10\%$. Это обеспечивает высокие электрические параметры планарных приборов и микросхем, повышенные плотности упаковки элементов в ИС, создание БИС и СБИС. В настоящее время уже разработаны ИС, содержащие десятки тысяч элементов на одном кристалле кремния, с плотностью упаковки до 1000 элементов/мм², а в ближайшем будущем число элементов на кристалле возрастет до 150 000. При этом достигнуто исключительно высокое быстродействие ИС, характеризуемое временем задержки 0,1—0,2 нс на один логический элемент.

Особенностью планарной технологии является также использование в ней *группового метода* изготовления ИС. На одной пластине кремния одновременно изготавливается много ИС. Их число зависит от диаметра пластины и размера площади, занимаемой ИС. После изготовления элементов структур, получения металлической разводки между элементами и металлических контактных площадок для присоединения внешних выводов корпуса ИС пластина кремния разрезается на отдельные кристаллы, содержащие уже только одну ИС. Дальнейшая обработка каждого кристалла (сборка в корпус, присоединение выводов) ведется индивидуально, что увеличивает стоимость процессов сборки ИС по сравнению с другими технологическими процессами. В результате, как показывают оценочные данные, затраты на сборочные операции составляют от 40 до 65% всех затрат на изготовление ИС в зависимости от степени интеграции. В настоящее время для снижения стоимости сборки стремятся использовать групповые методы в процессах сборки.

Групповой метод изготовления ИС — это своего рода *интеграция технологических процессов*, т. е. объединение в едином времени технологических процессов изготовления сотен и тысяч ИС. Появилась тенденция расширять интеграцию технологических процессов, объединяя их в непрерывный процесс, проходящий в еди-

ной реакционной камере или в замкнутой многокамерной системе. Уникальные структурные параметры и электрические характеристики ИС достигнуты в производственных условиях, характеризующихся исключительно высокой технологической гигиеной, использованием сложного технологического оборудования, особенно чистых химических реактивов.

Высокие требования предъявляются к чистоте производственных помещений. В 1 л воздуха должно содержаться не более трех пылинкок размером 0,3 мкм и более^{*}). При возрастании степени интеграции ИС требования к чистоте еще более повышаются. 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. Важное значение имеет спецодежда работающего персонала, которая должна быть изготовлена из материалов, не выделяющих пылевых частиц.

Требования к производственным условиям при использовании планарной технологии существенно выше тех, которые предъявляются при любом другом технологическом процессе. Учитывая эту особенность планарной технологии, можно отметить, что для повышения выхода годных приборов большое значение приобретает автоматизация технологических процессов, позволяющая минимально уменьшить численность персонала, снизить влияние субъективных качеств операторов, проводящих технологические процессы.

Глава 2

Обработка кремниевых подложек

§ 2.1. Введение

В производстве интегральных микросхем обычно используются полупроводниковые материалы в виде монокристаллических слитков, имеющих форму, близкую к цилиндрической. Размеры слитков зависят от метода их выращивания и типа полупроводникового материала.

В настоящее время наибольшее развитие получили ИС на основе монокристаллов кремния. Выбор кремния обусловлен высоким качеством пленки двуокиси кремния, получаемой относительно простым технологическим способом. Это облегчает в целом изготовление кремниевых ИС по планарной технологии. Кроме того,

^{*} В обычных условиях число пылинкок колеблется от 5000 до 1 000 000 в 1 л воздуха.

достаточно хорошо изучены методы легирования кремния различными примесями.

Пластины кремния, отрезанные от монокристаллического слитка и подвергнутые определенной механической и химической обработке, являются *подложками* для ИС.

§ 2.2. Механическая обработка кремния

В настоящее время при резке слитков кремния на пластины в качестве режущего инструмента применяют металлические диски с внутренней алмазной режущей кромкой (рис. 2.1). Инструмент представляет собой металлический диск с центральным отверстием, на кромку которого нанесена алмазная крошка. Толщина диска 0,1—0,15 мм, а диаметр отверстия обусловлен диаметром разрезаемого слитка. Схема установки для резки слитков представлена на рис. 2.2. Режущий инструмент (диск) растягивается и закрепляется в специальном барабане на головке шпинделя станка для резки. Слиток разрезается

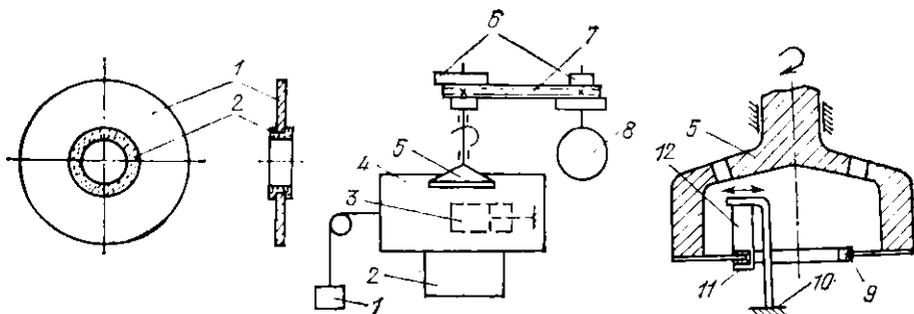


Рис. 2.1

Рис. 2.2

Рис. 2.1. Металлический диск с внутренней алмазной режущей кромкой:
1 — металлический диск; 2 — алмазная крошка

Рис. 2.2. Схема установки для резки алмазным диском:
1 — груз; 2 — нижний суппорт; 3 — гидравлическое устройство; 4 — верхний суппорт; 5 — головка шпинделя; 6 — шкивы; 7 — клиновидный ремень; 8 — мотор; 9 — алмазное покрытие; 10 — держатель; 11 — отрезаемая пластина; 12 — слиток

кромкой с алмазной крошкой при вращении шпинделя. Скорость вращения шпинделя 3000—5000 об./мин. Скорость движения слитка при его перемещении 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 плоскости вращения алмазного диска и тем самым обеспечивает ориентированную резку. Станок снабжен системой подачи воды для охлаждения режущего диска и вымывания отходов резки (частичек выкрошенного кремния).

Поверхность пластин, получаемых после резки, не удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к качеству поверхности Si при планарной технологии. С помощью электронографа устанавливаются наличие приповерхностных слоев, не имеющих моно-

кристаллической 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 10—30 мкм в зависимости от скорости вращения диска. Поскольку в ИС глина, на которой располагаются $p-n$ -переходы, составляет единицы и десятки доли микрона, наличие нарушенных слоев толщиной 10—30 мкм неприемлемо. Микронеровности на поверхности не должны превышать 0,02—0,1 мкм. Это выше требований 14-го класса чистоты обработки поверхности, в то время как чистота обработки поверхности пластин, отрезанных алмазным диском, соответствует только 7—8-му классам. Кроме того, для качественного проведения фотолитографии плоскопараллельность пластин следует поддерживать на уровне ± 1 мкм по диаметру пластины (вместо 10 мкм после резки).

Для обеспечения требуемого качества поверхности пластины должны быть подвергнуты дальнейшей обработке. Эта обработка состоит в *шлифовке* и последующей *полировке* пластин. Шлифовка и полировка пластин производится на плоскошлифовальных прецизионных станках с использованием абразивных материалов — *микророшков*.

В зависимости от типа микророшка выбирается материал поверхности шлифовальника. При шлифовке пластин микророшками М14-М5 применяют стеклянный шлифовальник, при полировке алмазными микророшками АСМ — специальные шлифовальники с поверхностью из тканевых материалов. При обработке пластин на рабочий шлифовальник устанавливаются три головки с наклеенными пластинами. Головки удерживаются от перемещения по шлифовальнику специальными направляющими кронштейнами с опорными роликами (рис. 2.3). За счет силы трения, возникающей между соприкасающимися поверхностями рабочего шлифовальника и головок, последние вращаются вокруг своих осей. Это вращение головок создает условия для более равномерного шлифования или полирования.

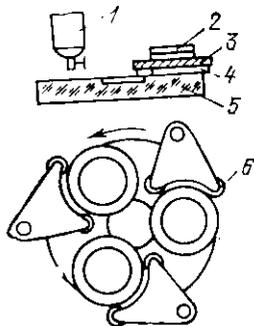


Рис. 2.3. Схема плоскошлифовального станка и расположение головок:

1 — дозирующее устройство с абразивной суспензией; 2 — грузы; 3 — головка; 4 — пластины; 5 — шлифовальник; 6 — направляющий ролик

При шлифовании микророшками М14-М5 используют водные суспензии с соотношением воды к абразиву 3 : 1, при полировке пластин — специальные алмазные пасты.

В настоящее время принята определенная последовательность операций при механической обработке пластин (табл. 2.1). При этом учитывается, что толщина снимаемого слоя на каждой операции должна превышать толщину нарушенного слоя, который образовался на предыдущей операции. Пластины шлифуют с двух сторон, а полируют только рабочую сторону. В целом механическая обработка для получения пластин, удовлетворяющих

Т а б л и ц а 2.1. Последовательность операций шлифовки и полировки кремния

Тип микропорошка	Толщина нарушенного слоя, мкм	Скорость удаления материала, мкм/мин	Класс чистоты поверхности	Тип микропорошка	Толщина нарушенного слоя, мкм	Скорость удаления материала, мкм/мин	Класс чистоты поверхности
M14	20—30	3	7	АСМ 1/0,5	5—7	0,35	13
M10	15—25	1,5	8—9	АСМ 0,5/0,3	Менее 3	0,25	13—14
АСМ 3/2	9—11	0,5—1,0	12—13	АСМ 0,3/0,1	«	0,2	14

требованиям планарной технологии, приводит к большому расходу кремния (около 65%) и к большим затратам времени.

Резка кремния производится и на заключительных стадиях технологического процесса изготовления ИС. Резке подвергаются пластины кремния с целью разделения их на отдельные кристаллы. Ниже рассмотрены методы такого разделения.

Метод скрайбирования состоит в нанесении на поверхность пластины кремния алмазным резцом — скрайбером — рисок в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Ширина риски, включая области сколов, не превышает 30—50 мкм. Под рисками образуются области с большими механическими напряжениями. При слабом механическом воздействии на такую пластину 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 испарением узкой полосы кремния. Преимущества использования лазерного луча состоят в повышении скорости образования риски (100—200 мм/с вместо 30—50 мм/с для алмазного резца), в отсутствии сколов и микротрещин, недостаток — в необходимости защищать поверхность от частиц распыляемого кремния. Разрезать пластины на кристаллы можно и алмазными дисками.

§ 2.3. Очистка поверхности кремния

Очистка поверхности кремниевых пластин проводится для удаления остатков абразивного материала, жировых и прочих загрязнений, оказавшихся на поверхности на предыдущих стадиях обработки, а также для устранения остатков травителей. Для очистки поверхности кремниевых пластин используются химические и физические методы. В первом случае эффект очистки достигается обработкой пластины в растворителях и кислотах. При этом происходит превращение металлических примесей, окислов и жиров в растворимые в воде соединения, которые промывкой в воде могут быть легко удалены с поверхности. Во втором случае разрыв связей между молекулами кремния и молекулами примесных загрязнений достигается сообщением последним достаточной энергии для испарения, например нагревом или ионной бомбардировкой в плазме тлеющего разряда.

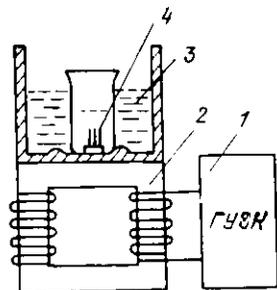
На предварительных этапах процесса очистки поверхности подложек ограничиваются только удалением загрязнений, при этом

подтравливание самого материала подложки исключается. В этом случае для очистки применяются материалы, удовлетворяющие следующим требованиям: они не должны вступать в химическую реакцию с кремнием, должны хорошо растворять жирные загрязнения и металлические примеси, по крайней мере один из них должен хорошо растворяться в воде. Материалы для очистки должны быть особо чистыми веществами*). Окончательным этапом очистки является стравливание приповерхностного слоя кремния с использованием газообразных травителей (*газовое травление*).

2.3.1. Последовательность технологических операций при очистке. В настоящее время разработаны и используются типовые технологические комплексы для очистки кремниевых пластин. Ниже приведена одна из возможных последовательностей технологических операций при очистке, проводимых после механической обработки и перед операцией термического окисления: многократная *ультразвуковая очистка* и кипячение в органических растворителях и серной кислоте; кипячение в азотной кислоте; промывка в проточной *деионизованной воде*; сушка на centrifуге; кипячение в смеси азотной и соляной кислот в соотношении 1 : 3; промывка в деионизованной воде; промывка в плавиковой кислоте; промывка в деионизованной воде; кипячение в смеси аммиака, перекиси водорода и воды в соотношении 2 : 2 : 1; промывка в деионизованной воде с применением кистей; сушка на centrifуге.

Рис. 2.4. Схема установки для ультразвуковой очистки:

1 — генератор ультразвуковых колебаний; 2 — электромеханический преобразователь; 3 — ванна с водой; 4 — пластины кремния



Для повышения эффективности и скорости удаления загрязнений при химической очистке пластин кремния используются нагрев или ультразвуковое возбуждение очищающих материалов. Ультразвуковая очистка наиболее широко применяется при обработке в растворителях. Схема установки для ультразвуковой очистки представлена на рис. 2.4. Ее основными узлами являются генератор ультразвуковых колебаний (ГУЗК), электромеханический преобразователь (вибратор), действие которого основано на явлении магнитострикции, и ванна с водой, непосредственно связанная с вибратором. В эту ванну помещается сосуд с растворителем и пластинами. Механические вибрации воды передаются растворителю и пластинам. При этом вибрация способствует перемешиванию и тем самым ускоряет растворение загрязнений. Кроме того, в результате вибрации с поверхности пластин удаляются нерастворимые частички различных материалов. Эффективность

*) В особо чистых веществах (ОСЧ) содержание примесей примерно на порядок меньше, чем в веществах марки ХЧ.

очистки зависит от частоты и мощности колебаний и типа растворителя. На ультразвуковых установках обычно проводят очистку от остатков абразивных материалов, используя в качестве растворителей трихлорэтилен, толуол, четыреххлористый углерод, ацетон.

Для очистки от остатков органических веществ используют кипячение в серной кислоте. Для удаления атомов металлов применяются кипячение в соляной и азотной кислотах, промывка во фтористоводородной (плавиковой) кислоте. Заключительной операцией является промывка в деионизованной воде.

После механической обработки и очистки поверхности пластины кремния могут храниться достаточно длительное время. В этом случае иногда поверхность пластины покрывают лаком, образующим при затвердевании тонкую пленку, способную легко, без разрушения, отрываться от поверхности. Пленка защищает поверхность при хранении от механических повреждений и пыли.

Контроль чистоты поверхности является обязательной операцией в технологическом процессе очистки. Есть несколько достаточно простых методов, позволяющих установить наличие загрязнений на поверхности кремниевых пластин.

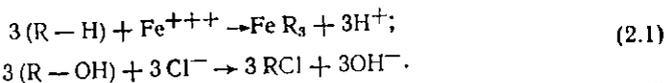
Один из них — микроскопическое исследование полированной поверхности пластины при косом освещении (исследование в темном поле). Луч света падает на поверхность пластины под малым углом, так что отраженные лучи не попадают в объектив. Чистая поверхность пластины — темная, видны только загрязнения в виде ярких точек, на которых рассеивается свет, проникая частично в объектив.

Другой метод — обнаружение масел и жиров при опрыскивании пластины 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.

2.3.2. 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 1—3 МОм·см. На окончательных этапах очистки используют *деионизованную* воду с удельным сопротивлением до 20 МОм·см.

Деионизованная вода получается при пропускании дистиллированной воды через ионо-обменные смолы, которые разделяются на два класса — катиониты (поглощают ионы металлов) и аниониты (поглощают ионы кислотных остатков).

Химическая формула катона $R-H$, где R — органический радикал, химическая формула аниона $R-OH$. При очистке, например, от $FeCl_3$ происходят следующие реакции:

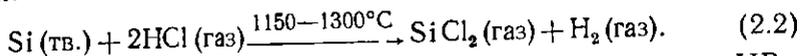


Ионы железа и хлора оказываются связанными с органическими радикалами, а вновь образовавшиеся ионы являются составляющими воды. Необходимо учитывать, что деионизованная вода содержит органические частицы, которые могут стать источником загрязнения поверхности подложки. Для их устранения деионизованная вода фильтруется мембранными фильтрами из тонких пленок нитроцеллюлозы, нейлона и других материалов, обеспечивающих размеры отверстий от долей до нескольких микрон.

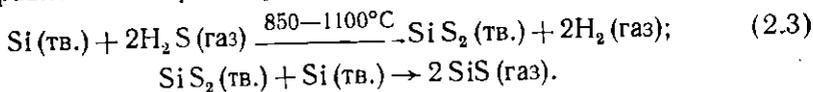
2.3.3. Очистка поверхности газовым травлением. В последнее время в планарной технологии широко используется газовое травление пластин кремния как метод окончательной очистки их поверхности. Помимо удаления загрязнений с поверхности происходит стравливание слоя кремния с механическими нарушениями.

Газовое травление обычно применяется в тех технологических процессах, в которых особо важную роль играет структура поверхностного слоя, например при эпитаксиальном наращивании или при получении подзатворного окисла в МДП-структурах.

В качестве травителей используют смеси водорода или гелия с галогенами (фтор, хлор, бром), галогеноводородами (HBr , HCl), 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 $800-1300^\circ C$ либо в установках для окисления, либо непосредственно в реакторах для эпитаксиального наращивания. При травлении кремния в HCl происходит следующая реакция:



Аналогичная реакция происходит при травлении кремния в HBr . При травлении в сероводороде 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. 5.

§ 2.4. Травление кремния

Травление пластин кремния происходит на границе твердой и жидких сред и может рассматриваться как гетерогенная реакция. Процесс травления состоит из пяти стадий: диффузия реагента к

поверхности; адсорбция реагента; химическая реакция; десорбция продуктов реакции; 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.

2.4.1. Скорость травления. Скорость диффузии реагента в соответствии с законом Фика

$$v_d = D(N_{об} - N_{пов})/\delta, \quad (2.4)$$

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

Скорость химической реакции

$$v_p \propto (N_A)^a (N_B)^b e^{-\Delta W/RT}, \quad (2.5)$$

где N_A и N_B — концентрации реагирующих веществ; ΔW — энергия активации химической реакции; R — универсальная газовая постоянная. Показатели a и b для простых реакций равны численным коэффициентам, стоящим перед формулами веществ в уравнении химической 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 диффузии в жидкостях (ΔW_d), 1—4 ккал/моль. Энергия активации химических реакций для различных травителей может иметь порядок единиц, десятков и сотен килокалорий на моль. В зависимости от соотношения ΔW и ΔW_d контролирующей стадией является либо химическая реакция ($\Delta W > \Delta W_d$), либо диффузия ($\Delta W < \Delta W_d$).

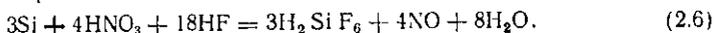
В первом случае скорость травления чувствительна к состоянию поверхности, поскольку энергия активации химической реакции в большей мере зависит от неоднородности поверхности. Так, шлифованная поверхность имеет меньшие значения энергии активации, чем полированная. Энергию активации снижают дислокации и другие дефекты кристалла. Поскольку различные кристаллографические плоскости имеют различные значения ΔW , скорость травления зависит от ориентации пластины, а также от температуры. Травители, для которых контролирующей стадией является химическая реакция, называют *селективными*.

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

2.4.2. Травление в полирующих травителях. Типичными полирующими травителями для кремния являются смеси азотной и

плавиковой кислот. Травление кремния происходит в соответствии с электрохимической теорией растворения кремния.

Согласно этой теории вся поверхность пластины, покрытая раствором травителя, состоит из большого числа микроэлектродов — катодов и анодов. На анодных участках происходит окисление кремния с последующими растворением оксида и образованием кремнийфтористоводородной кислоты, на катодных — восстановление азотной кислоты. Результирующее уравнение, описывающее растворение кремния в смеси азотной и плавиковой кислот, имеет вид



Скорость травления кремния в смеси кислот HF и HNO_3 определяется диффузией реагентов к поверхности кремния. При этом происходит сглаживание поверхностного рельефа (рис. 2.5). Выступы на поверхности травятся быстрее впадин вследствие более высокого градиента концентрации.

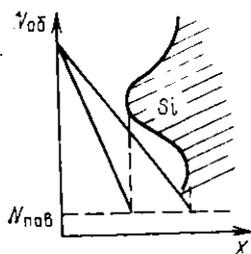


Рис. 2.5

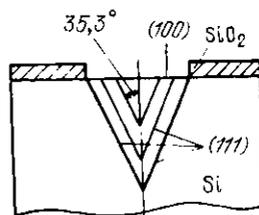


Рис. 2.6

Рис. 2.5. Градиент концентрации травителя вблизи впадин и выступов кремниевой поверхности

Рис. 2.6. Получение V-образных областей при локальном анизотропном травлении кремния

2.4.3. Травление в селективных травителях. Селективными травителями для кремния являются 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*.

Представленные на рис. 2.6 V-образные области получаются при локальном травлении пластины кремния, ориентированных по плоскости (100). Для маскирования используется пленка двуокиси кремния. Границы окон в пленке SiO_2 следует располагать по направлению пересечения плоскостей (111) с поверхностью, т. е. по направлению (110). Каждую плоскость (100) пересекает ряд плоскостей (111). Анизотропный травитель растворяет плоскость (100) до тех пор, пока не выявится плоскости (111), начинающиеся у краев окна в пленке SiO_2 . Точность углов между плоскостями (в данном случае угол, образованный плоскостями (111)

с вертикалью, составляет $35,3^\circ$) позволяет получить углубление строго определенной формы.

Такие V-образные области применяются в технологии ИС для получения изолирующих областей (см. гл. 7). Анизотропное травление — неотъемлемый процесс при изготовлении ИС с *балочными*

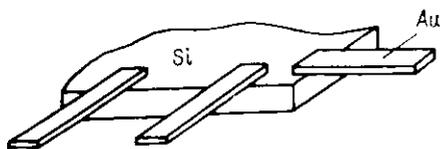


Рис. 2.7

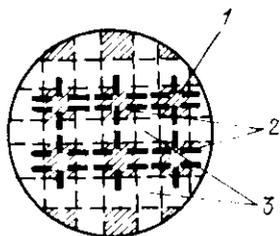


Рис. 2.8

Рис. 2.7. Структура кристалла полупроводниковой ИС с балочными выводами

Рис. 2.8. Разделение пластины на кристаллы с балочными выводами методом анизотропного травления;

1 — пластина кремния; 2 — участки пластины, покрытые SiO_2 , на которых располагается ИС; 3 — участки пластины (окна в пленке SiO_2), вытрачиваемые в анизотропном травителе

ми выводами (рис. 2.7). Разделение пластины на кристаллы сквозным анизотропным вытравливанием кремния происходит на участках между балками (штриховые линии на рис. 2.8).

Глава 3

Легирование кремния

§ 3.1. Введение

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

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

Первое уравнение имеет вид

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

где N — концентрация частиц (атомов примеси); J — плотность потока этих частиц, т. е. число частиц, проходящих за единицу времени через единичную площадь; D — коэффициент диффузии.

Этот закон устанавливает, что при наличии в какой-либо среде неравномерного распределения атомов примеси (градиента

концентрации) возникает направленный диффузионный поток атомов, стремящийся выравнивать концентрацию.

Поскольку поток атомов стремится свести к нулю градиент концентрации, то коэффициент диффузии является мерой скорости, с которой рассматриваемая среда способна при заданных условиях выравнивать разность концентраций.

Второе уравнение имеет вид

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

Решение этого уравнения позволяет получить распределение диффундирующих атомов как функцию времени.

В настоящее время считается, что диффузия в твердых кристаллических телах, в том числе и в полупроводниках, обусловлена существованием в них точечных дефектов. Любой атом кристаллической решетки в соответствии с максвелловским законом распределения может приобрести энергию, существенно превышающую среднюю кинетическую энергию атомов, преодолеть потенциальный барьер, созданный окружающими атомами, и 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 (вакансий) называют *дефектами по Шотки* (рис. 3.1,б).

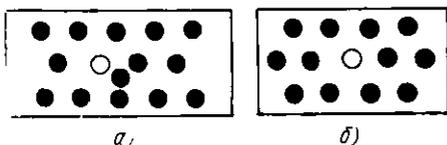


Рис. 3.1

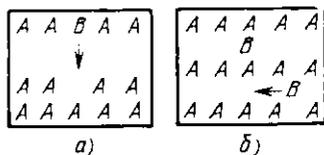


Рис. 3.2

Рис. 3.1. Точечные дефекты в кристаллах:

а — по Френкелю; б — по Шотки

Рис. 3.2. Механизмы диффузии примесей в кристалле полупроводника:

а — вакансионный; б — междуузельный

Атомы элементов III и V групп периодической системы Д. И. Менделеева при наличии градиента концентрации перемещаются в кристалле полупроводника, занимая места вакансий (вакансионный механизм диффузии, рис. 3.2,а). Эти атомы примеси образуют твердые растворы замещения. Для примесей других

групп периодической системы, например I и VIII, характерен другой механизм диффузии — междуузельный (рис. 3.2,б).

Коэффициент диффузии, характеризующий скорость диффузионного процесса, экспоненциально зависит от температуры проведения процесса. Для вакансионного механизма диффузии $D = D_0 \exp[-(W + W')/kT]$, где W — энергия образования вакансии; W' — энергетический барьер, преодолеваемый атомом примеси при переходе на расположенную рядом с ним вакансию. Только при высоких температурах (для кремния выше 1000°C) обеспечиваются большая концентрация вакансий* и приемлемая для практических задач скорость диффузии примеси.

Метод ионного внедрения примесей в полупроводники состоит в том, что на поверхность полупроводниковой пластины определенной ориентации подается лучок ускоренных ионов с энергиями, достаточными для их внедрения в полупроводник. Ускоренные ионы при внедрении испытывают соударения с электронами и атомами полупроводника и термозятся.

И образование вакансий, и их заполнение ионами примеси являются результатом взаимодействия ускоренных ионов с кристаллической решеткой. Поэтому ионное внедрение может проводиться при существенно более низких температурах, чем диффузия.

§ 3.2. Теория диффузионных процессов

При создании микроэлектронных схем необходимо иметь данные о распределении концентрации примеси и 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 справедливо для полупроводников, в которых предельные растворимости вводимых примесей низки); диффузия происходит в полуограниченном теле; начальное распределение примеси в момент $t=0$ определяется функцией $N(x, 0)$.

Решение уравнения диффузии для полуограниченного тела зависит от условий на граничной плоскости $x=0$. 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.

$$J(0, t) = -D \left. \frac{dN}{dx} \right|_{x=0} = 0. \quad (3.3)$$

Плоскость $x=0$ является связывающей, если в любой момент времени, отличный от нуля, концентрация примеси в этой плоскости равна нулю (случай испарения примеси из полупроводника), т. е.

$$N(0, t)|_{t \neq 0} = 0. \quad (3.4)$$

Решение уравнения диффузии для полуограниченного тела имеет вид: с отражающей границей

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^\infty N(\xi, 0) \left\{ \exp\left(-\frac{(\xi - x)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(\xi + x)^2}{4Dt}\right) \right\} d\xi; \quad (3.5)$$

*) Концентрация вакансий при комнатной температуре около 10^7 — 10^8 см⁻³, а при $T=1200^\circ\text{C}$ 10^{15} — 10^{16} см⁻³.

со связывающей границей

$$N(x, t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}} \int_0^{\infty} N(\xi, 0) \left[\exp\left(-\frac{(\xi-x)^2}{4Dt}\right) - \exp\left(-\frac{(\xi+x)^2}{4Dt}\right) \right] d\xi. \quad (3.6)$$

Рассмотрим некоторые частные случаи.

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

$$N(x, 0) = \begin{cases} N_s & \text{для } 0 \leq x \leq h; \\ 0 & \text{для } h \leq x \leq \infty. \end{cases} \quad (3.7)$$

т. е. в слое толщиной h концентрация примеси всюду постоянна и равна N_s , за пределами слоя — равна нулю (рис. 3.3). Решение уравнения диффузии имеет вид

$$N(x, t) = \frac{N_s}{2} \left(\operatorname{erf} \frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf} \frac{h+x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (3.8)$$

Распределение примеси для этого случая представлено на рис. 3.3.

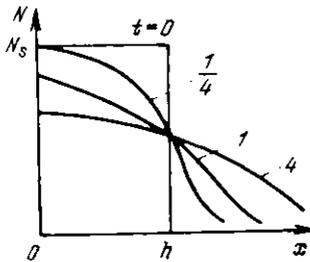


Рис. 3.3

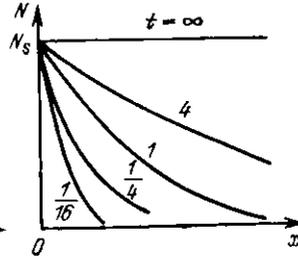


Рис. 3.4

Рис. 3.3. Распределение примеси при диффузии из ограниченного источника

Рис. 3.4. Распределение примеси при диффузии из неограниченного источника

Поверхностная концентрация убывает со временем

$$N(0, t) = N_s \operatorname{erf} (h/2\sqrt{Dt}). \quad (3.9)$$

Для $x < Dt/h$ и $t > h^2/D$ уравнение (3.8) приближенно можно выразить в виде функции Гаусса

$$N(x, t) \approx \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (3.10)$$

где $Q = N_s h$ — общее количество атомов диффундирующего вещества в слое толщиной h , отнесенное к единице площади.

3.2.2. 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 условия задаются в виде

$$N(x, t)|_{t \neq 0} = N_s; \quad N(x, 0) = 0. \quad (3.11)$$

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 $N(x, t) = N_s$. Следовательно, для функции $N(x, t)$ выполняется соотношение (3.6), которое для равномерного распределения примеси, когда $N(\xi, 0) = N_s$, можно преобразовать к виду

$$\bar{N}(\xi, 0) = N_s \operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt}). \quad (3.12)$$

Отсюда

$$N(x, t) = N_s - \bar{N}(x, t) = N_s (1 - \operatorname{erf}(x/2\sqrt{Dt})). \quad (3.13)$$

Распределение концентрации примеси для неограниченного источника дано на рис. 3.4.

3.2.3. Многостадийная диффузия. При изготовлении структур элементов ИС 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 на первой стадии, а затем ее перераспределение на второй. На 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 (3.13). На второй стадии диффузия проводится из ограниченного источника (из конечного слоя с неоднородным распределением примеси). При этом снижается поверхностная концентрация (что характерно для диффузии из ограниченного источника) и увеличивается глубина проникновения примеси.

Результирующее распределение примеси соответствует функции Гаусса (3.10). Однако в данном случае количество атомов примеси в слое, созданном за время первой стадии t_1 , на единицу поверхности следует определять из

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt, \quad (3.14)$$

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

С учетом того, что плотность потока примеси через границу $x=0$

$$J(t) = -D \frac{dN}{dx} \Big|_{x=0} = \frac{DN_s}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{2Dt}\right) \Big|_{x=0} = N_s \sqrt{\frac{D}{\pi t}}. \quad (3.15)$$

согласно (3.14) количество атомов примеси, поступившее в полуограниченное тело за время t_1

$$Q = \frac{2N_s}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt}. \quad (3.16)$$

3.2.4. 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 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

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right). \quad (3.17)$$

Уравнения (3.2) и (3.17) решены численными методами. Полученные решения показывают, что на расстояниях от края маскирующего покрытия, боль-

ших $4\sqrt{Dt}$, глубина проникновения примеси практически не отличается от полученной для одномерного случая. Если ширина полосы, в которую проводится диффузия, меньше $4\sqrt{Dt}$, 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 диффузантов

Диффузантами называют те примеси, которые вводят в полупроводник в процессе диффузии. В настоящее время исследована диффузия многих примесей в кремний, германий, арсенид галлия. Для кремния все диффузаны принято разделять на две группы: примесные элементы III и V групп периодической системы, которые резко изменяют проводимость кремния, и примесные элементы I и VIII групп, которые создают в запрещенной зоне кремния глубоко лежащие уровни захвата или рекомбинации и изменяют время жизни носителей заряда. Графики зависимости коэффициентов диффузии от температуры для доноров и акцепторов представлены соответственно на рис. 3.5 и 3.6.

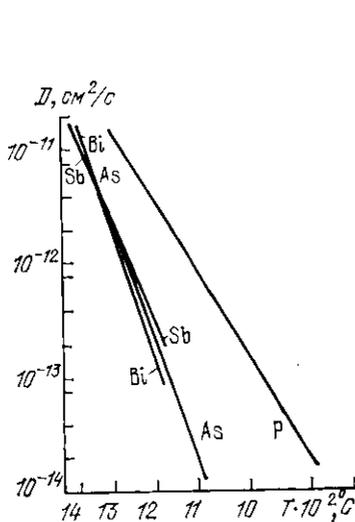


Рис. 3.5

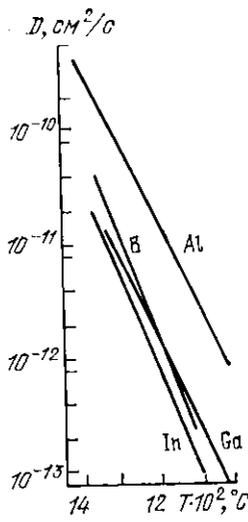


Рис. 3.6

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

Рис. 3.6. Зависимость 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 при-

меси не соответствуют теоретическим. Это несоответствие теоретических и экспериментальных результатов объясняется концентрационной зависимостью коэффициентов диффузии. Такая зависимость коэффициента диффузии может возникнуть благодаря влиянию внутренних электрических полей. При диффузии в полупроводнике пониженной примеси происходит одновременно и диффузия свободных носителей заряда, образованных при ионизации примеси. Электрическое поле препятствует разделению зарядов и удерживает свободные носители вблизи попов. За счет возникновения внутреннего электрического поля при высокой концентрации вводимой примеси может происходить удвоение коэффициента диффузии.

На рис. 3.7 показаны экспериментально полученные зависимости 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 при концентрациях 10^{20} — 10^{21} см^{-3} только влиянием электрического поля (которое может привести не более как к удвоению коэффициента диффузии) не представляется возможным. Они объясняются с помощью других физических эффектов, которые могут приводить к концентрационной зависимости коэффициентов диффузии. Одним из таких эффектов может быть возникновение при высоких концентрациях примеси дислокаций и дополнительных вакансий.

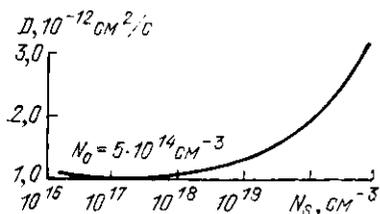


Рис. 3.7

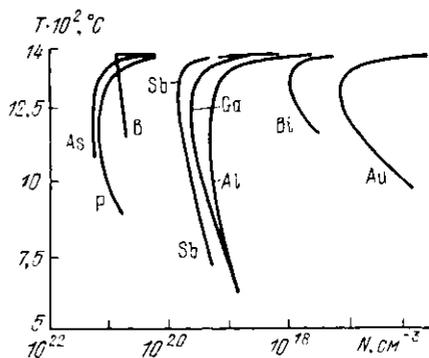


Рис. 3.8

Рис. 3.7. Экспериментальная зависимость коэффициента диффузии фосфора в кремнии от поверхностной концентрации примеси

Рис. 3.8. Зависимость растворимости примесей в твердом кремнии от температуры

Наряду с коэффициентом диффузии другой важной характеристикой диффузантов является их *растворимость* в кремнии. Существует определенная взаимосвязь между коэффициентами диффузии и растворимостями диффузантов. Эта взаимосвязь обус-

ловлена тем, что и диффузия, и растворимость определяются одними и теми же параметрами, 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.

§ 3.4. Практические способы проведения диффузии

С тех пор, как метод диффузионного введения примесей в полупроводник был впервые использован для создания $p-n$ -переходов, и до настоящего времени идет постоянное его совершенствование. Оно направлено на повышение воспроизводимости основных параметров диффузионных слоев — поверхностной концентрации примеси и толщины, на расширение диапазона их регулирования, а также на общее снижение стоимости проводимых процессов. Поэтому к настоящему времени разработано уже достаточно большое число различных способов проведения диффузии. Здесь будет рассмотрен тот процесс диффузии донорных и акцепторных примесей в кремнии, который нашел наибольшее распространение в планарной технологии. Таким процессом является диффузия в потоке газа-носителя (диффузия по способу открытой трубы). При этом в качестве источников диффузантов могут использоваться твердые, жидкие и газообразные вещества. Схемы установок для диффузии в потоке газа-носителя для твердых, жидких и газообразных источников примеси представлены на рис. 3.9.

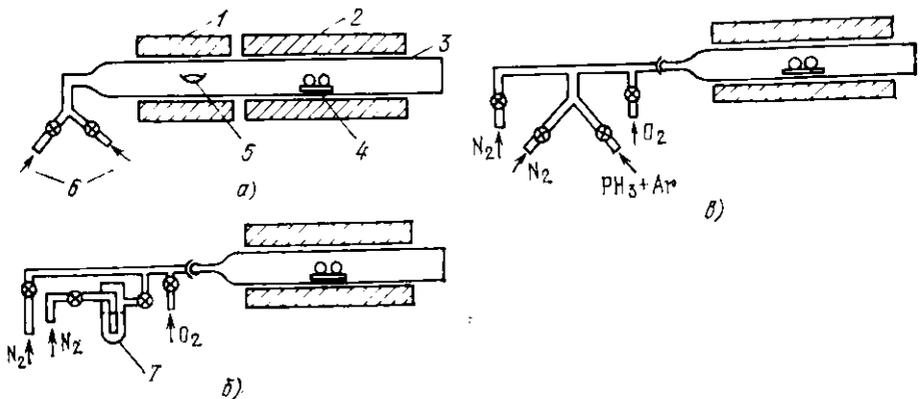


Рис. 3.9. Схемы установок для диффузии в потоке газа-носителя для твердых (а), жидких (б) и газообразных (в) источников примеси:

1, 2 — трубчатые печи; 3 — кварцевая труба; 4 — пластина кремния; 5 — твердый источник примеси; 6 — газовые потоки; 7 — сосуд с жидким источником примеси

При использовании твердых источников примеси установка состоит из открытой кварцевой трубы, проходящей через две трубчатые печи с независимой регулировкой температуры, обеспечивающих две зоны постоянной температуры и плавное монотонное изменение температуры от первой зоны ко второй. В одну зону (зону диффузии) помещаются пластины кремния, в другую (зону источника) — источник примеси. Диапазон рабочих температур составляет $(700\text{---}1300) \pm 0,5^\circ \text{C}$ в зоне диффузии протяженностью 300 мм и $(400\text{---}1100) \pm 2^\circ \text{C}$ в зоне источника протяженностью 60 мм. В качестве твердых источников акцепторов и доноров обычно используются окислы бора и фосфора.

Через трубу пропускается поток газа, основной функцией которого является перенос испаряющихся молекул источника примеси в зону диффузии. Обычно используют аргон, азот, иногда эти газы с примесями кислорода или водорода. В зоне диффузии происходят химические реакции



В результате реакции образуются элементарная примесь и двуокись кремния. Продукты реакции, а также сплав SiO_2 с окислом примеси создают стеклообразные слои на поверхности кремния, которые становятся источником примеси. Эти слои предохраняют кремний от эрозии и испарения.

Поверхностная концентрация примеси при диффузии в двухзонных печах зависит от температуры источника, его насыщенности водяными парами, состава газа-носителя, скорости и характера его потока (ламинарный или турбулентный). Борный и фосфорный ангидриды начинают интенсивно испаряться при температурах, превышающих соответственно 700 и 200°C . Скорость газа-носителя обычно составляет около $1500 \text{ см}^3/\text{мин}$. Не все факторы, влияющие на поверхностную концентрацию, можно хорошо контролировать. К ним в первую очередь следует отнести количество водяных паров в таких сильно поглощающих влагу веществах, как борный и особенно фосфорный ангидриды. Практически B_2O_3 и P_2O_5 невозможно поместить в установку для диффузии, исключив при этом их загрязнение парами воды. Присутствие воды в источнике увеличивает разброс поверхностной концентрации примеси, что является основным недостатком диффузии из твердых источников диффузантов.

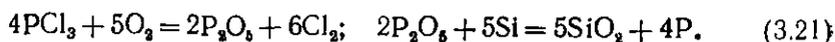
Этот недостаток устраняют применением жидких источников примеси, которыми обычно служат галогениды. В этом случае установка для диффузии имеет одну высокотемпературную зону (рис. 3.9,б). Для испарения жидкого источника примеси достаточно поддерживать его температуру в интервале $20\text{---}40^\circ \text{C}$. 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 $1000 \text{ см}^3/\text{мин}$, слабый поток ($\sim 10 \text{ см}^3/\text{мин}$) такого же газа, пред-

варительно прошедший через жидкий источник, и слабый поток кислорода (~ 15 см³/мин). При использовании жидких источников наличие кислорода в составе газа-носителя имеет принципиальное значение, поскольку приводит к образованию окислов примеси.

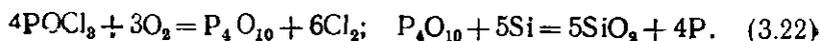
Так, для VBr_3 в зоне диффузии проходят следующие химические реакции:



Для PCl_3



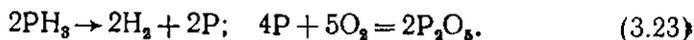
Хлорокись фосфора $POCl_3$ в зоне диффузии разлагается с образованием P_4O_{10} , PCl_3 и Cl_2 . Для нее кроме реакций (3.21) могут проходить реакции



Рассмотренные химические реакции сопровождаются образованием свободного хлора, способного травить поверхность кремния. При достаточном содержании кислорода 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 твердых и жидких могут применяться и газообразные источники — обычно гидриды примесей, например фосфин PH_3 , диборан B_2H_6 , арсин AsH_3 . 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 $440^\circ C$ и образование фосфорного ангидрида



На поверхности кремния проходит реакция $2P_2O_5 + 5Si = 5SiO_2 + 4P$.

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

§ 3.5. Легирование кремния ионным внедрением

Метод ионного внедрения примесей по сравнению с диффузией имеет ряд достоинств, которые обусловили его широкое использование в технологических процессах изготовления ИС. Одно из них — возможность внедрения примеси при сравнительно низких температурах кремниевых пластин — уже отмечалось. При этом профиль распределения внедренной примеси и ее концентра-

ция могут регулироваться независимо: профиль — энергией ионов, концентрация — дозой облучения. Кроме того, при ионном внедрении концентрация примеси не ограничивается, как в процессе диффузии, предельной растворимостью, соответствующей температуре процесса.

Однако неглубокое проникновение примеси при ионном внедрении (например, для бора и фосфора 0,2—0,4 мкм) заставляет использовать ионное внедрение лишь в сочетании с диффузионным методом легирования.

3.5.1. Физические основы ионного внедрения. Согласно теоретической модели процесса внедрения ионов в кристаллическое тело ионный пучок, падающий на поверхность кристалла, распадается на два пучка: *беспорядочный* (неканалированный) и *каналированный*. Беспорядочный пучок содержит частицы, которые ударяются о поверхность кристалла вблизи регулярных атомов кристаллической решетки на расстоянии, меньшем некоторого критического значения. При этом в силу взаимодействия с этими атомами они сильно рассеиваются, поэтому для ионов беспорядочного пучка кристалл является как бы аморфным телом. Каналированный пучок содержит частицы, которые, не испытав близких столкновений с поверхностными атомами, могут дальше продвигаться по междузельному пространству кристаллической решетки вдоль атомных плоскостей, как бы по каналам. Каналированный пучок возникает, когда 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 взаимодействием как с электронами, так и с атомами кристаллической решетки. Предполагается, что преобладающим механизмом потерь энергии канализованными ионами является взаимодействие с электронами (электронное торможение). Если предположить, что канализованный и неканализованный пучки тормозятся независимо друг от друга, то распределение внедренных ионов получается суперпозицией распределений для обоих пучков.

При отсутствии эффекта канализования рассеяние ионов носит случайный характер и распределение их пробегов описывается функцией Гаусса. Для построения кривой распределения примесей необходимо знать два параметра: *среднюю проекцию пробега* R_p (средний пробег в направлении первоначальной траектории иона — рис. 3.10) и ее среднее квадратическое отклонение ΔR_p .

Распределение концентрации примеси в полупроводнике

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm N_0, \quad (3.24)$$

где N_0 — исходная концентрация внедряемой примеси в полупроводнике; Q — поверхностная плотность внедряемых ионов, которая определяется из дозы облучения $D = q l Q$, где l — целое число, соответствующее заряду иона.

На рис. 3.11 представлено распределение примеси в виде зависимости относительной концентрации $N(x)/N_{\max}$ от расстояния вглубь полупроводника. Максимальная концентрация внедренной примеси

$$N_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} = \frac{D}{\sqrt{2\pi} q l \Delta R_p} \quad (3.25)$$

не соответствует поверхностной концентрации (что было характерно для диффузионных процессов), а наблюдается в глубине полупроводника. С увеличением энергии ионов максимум концентрации ионов перемещается вглубь полупроводника, а поверхностная концентрация падает.

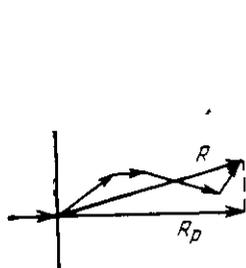


Рис. 3.10

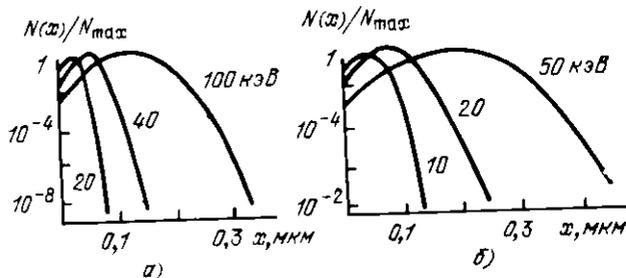


Рис. 3.11

Рис. 3.10. Схема для иллюстрации понятия проекции пробега
Рис. 3.11. Распределение фосфора (а) и бора (б) при ионном внедрении

С повышением энергии ионов, изменяющих тип проводимости полупроводника, их концентрация вблизи поверхности может быть настолько низкой, что перекомпенсации исходной примеси не произойдет. В этом случае инверсионный слой формируется в глубине полупроводника, образуя два p — n -перехода. Образование «скрытого» инверсионного слоя экспериментально наблюдалось при внедрении ионов с энергиями от 1 до 2,5 МэВ. Схематично образование переходов при внедрении ионов малых (до 400 кэВ) и больших энергий (до 2,5 МэВ) показано на рис. 3.12.

Присутствие каналированных пучков изменяет характер распределения примеси. Оно вызывает обычно нежелательное в технологических процессах изготовления ИС появление на большей глубине второго максимума. Знание критических углов позволяет соответствующей разориентацией пластины или выбором угла падения пучка по отношению к главным кристаллографическим направлениям исключить или ослабить эффект каналирования.

3.5.2. 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 междуузлиях, так и в узлах кристаллической решетки. Только в последнем случае они создают свободные носители заряда и определяют тем самым электропроводность легированного слоя. В междуузельном 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. Степень отличия характеризуется величиной k_n , называемой *коэффициентом использования* вводимой примеси. При внедрении акцепторной примеси

$$k_n = (n_p + N_d) / N_a, \quad (3.26)$$

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 определяется коэффициент использования при внедрении донорной примеси. Если каждый введенный атом примеси становится ионизированным акцептором или донором, то $k_n = 1$.

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 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 приводят к появлению энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, увеличивая скорость рекомбинации и понижая концентрацию свободных носителей заряда; они снижают подвижность носителей заряда. Таким образом, электропроводность легированных слоев определяется концентрацией не только введенной примеси, но и структурных дефектов.

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. 3.13).

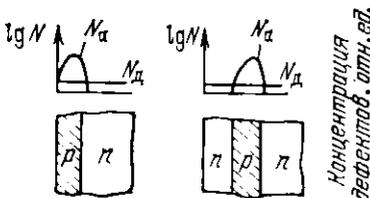


Рис. 3.12

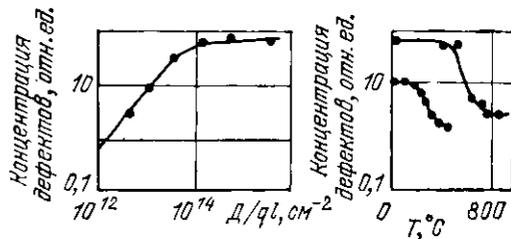


Рис. 3.13

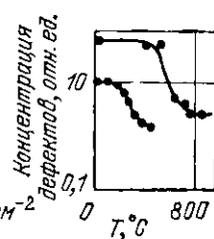


Рис. 3.14

Рис. 3.12. Образование $p-n$ -переходов при внедрении ионов малых и больших энергий

Рис. 3.13. Зависимость концентрации дефектов от дозы облучения

Рис. 3.14. Зависимость концентрации дефектов от температуры отжига

Для снижения концентрации дефектов после ионного внедрения проводится *отжиг* полупроводниковых пластин. Кривые отжига дефектов для кремния при внедрении ионов сурьмы представлены на рис. 3.14. Из рисунка видно, что если количество структурных нарушений достигало насыщения, то температура отжига выше (600°C) по сравнению с температурой, при которой дозы облучения меньше и насыщение не достигается. В последнем случае практически полный отжиг происходит при температурах ниже 400°C .

Проведение отжигов при $T=400\text{--}700^{\circ}\text{C}$ приводит к возрастанию коэффициента использования примеси, поскольку тепловое возбуждение кристаллической решетки способствует расположению ионов в ее узлах. На рис. 3.15 представлена зависимость коэффициента 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.

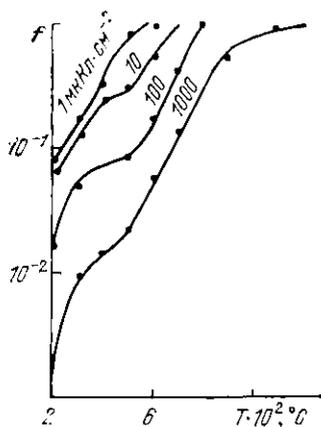


Рис. 3.15

Рис. 3.15. Зависимость коэффициента использования примеси от температуры отжига для различных доз облучения при внедрении бора

3.5.3. Практические способы проведения процесса ионного внедрения. Схема установки для ионного внедрения представлена на рис. 3.16.

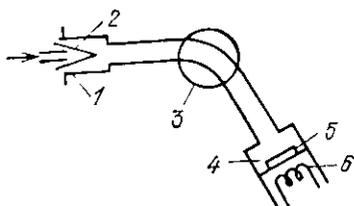


Рис. 3.16

Рис. 3.16. 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. Ионизируемые вещества, содержащие требуемую примесь, могут быть твердотельными или газообразными. Например, для получения ионов фосфора можно использовать либо ангидрид фосфора P_2O_5 , либо газ PF_5 , для получения ионов бора — газ BF_3 . Ионизация паров легирующей примеси осуществляется бомбардировкой электронами, эмиттируемыми термокатодом. Положительные ионы экстрагируются из области их образования с помощью отрицательно за-

ряженного пустотелого зонда, фокусируются в пучок электростатическими линзами и ускоряются напряжением 20—300 кВ, подаваемым на ускоряющий электрод.

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

$$r = (1/H) (2MU/q)^{1/2}. \quad (3.27)$$

Напряженность магнитного поля составляет $4 \cdot 10^5$ — $4,8 \cdot 10^5$ 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. Сепарирование ионов по массам обеспечивает одно из основных преимуществ легирования полупроводников ионным внедрением, а именно исключительно высокую чистоту внедряемой примеси. В камере с мишенью обычно предусматривается возможность нагрева мишени.

При изготовлении ИС с использованием ионного легирования, как и при диффузии, примесь должна внедряться локально. Для проведения локального ионного внедрения используются маскирующие пленки из материалов, в которых пробеги ионов существенно меньше, чем в кремнии. К таким материалам относятся диэлектрики SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 и металлы Al , Ni , Au . Наиболее широко в качестве маскирующей пленки в технологии биполярных ИС используются пленки SiO_2 , а в технологии МДП ИС — пленки SiO_2 и Al . Поскольку пробег иона зависит от его энергии, то, следовательно, от энергии ионов зависит и необходимая толщина маскирующей пленки. Так, при энергии 200 кэВ толщина маскирующей пленки SiO_2 при внедрении бора составляет около 1 мкм. При снижении энергии до 100 кэВ для маскировки достаточна толщина 0,65 мкм. Для тех же значений энергии при внедрении мышьяка толщина маскирующей пленки SiO_2 примерно 0,2 и 0,12 мкм соответственно. В алюминии пробеги ионов еще более низки, чем в SiO_2 . От внедрения бора при энергии 100 кэВ защищает пленка толщиной всего 0,4 мкм. Использование в качестве маскирующей пленки алюминия заставляет снижать температуру отжига радиационных дефектов ниже температуры эвтектики алюминия с кремнием 575°C , например, до 550°C . Применение маскирующих пленок SiO_2 позволяет проводить высокотемпературные отжиги (800 — 900°C) без существенного изменения полученного профиля распределения примеси.

Ионное внедрение примесей наряду с диффузией широко используется в технологии изготовления ИС. В биполярных ИС применение ионного внедрения упрощает процесс получения эмиттеров малых площадей, поскольку здесь при локальном внедрении

практически отсутствует боковое продвижение примеси под защитную маску. Более низкие по сравнению с диффузией температуры термических отжига при ионном внедрении приводят к упрощению технологии ИС, включающих $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы, поскольку ослабляется взаимовлияние легированных слоев в процессе их образования. Для ионного внедрения примеси характерны высокая однородность легирования по поверхности пластины и точный контроль общего количества внедренной примеси. Поэтому замена первого этапа диффузии (загонки) при создании базовой области транзистора на ионное внедрение примеси обеспечивает более воспроизводимые структурные и электрические параметры транзисторов в биполярных ИС.

В МОП ИС использование ионного внедрения направлено в основном на получение МОП-транзисторов с самосовмещенным затвором. Типовой процесс изготовления ИС с такими транзисторами будет рассмотрен в гл. 7.

§ 3.6. Методы изучения характеристик легированных слоев

Основными параметрами легированных слоев являются сопротивление слоя, глубина, на которой образуется $p-n$ -переход, концентрация примеси на поверхности. Удельное сопротивление слоя измеряется *четырёхзондовым методом*. На поверхности кремния по прямой линии располагают четыре зонда на равных расстояниях друг от друга. Через внешние зонды пропускают ток, внутренние служат для измерения падения напряжения компенсационным методом. Схема измерения удельного сопротивления слоя представлена на рис. 3.17. Если диффузионный слой имеет только с одной стороны пластины и его можно рассматривать в определенном приближении как слой бесконечно малой толщины и неограниченных размеров, то падение напряжения между средними зондами

$$U = \frac{IR_s}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{s} - \ln \frac{s}{2s} \right) = \frac{IR_s}{2\pi} (\ln 2 - \ln 0,5), \quad (3.28)$$

$$R_s = 4,5324 U/I,$$

где R_s — удельное сопротивление слоя*; s — расстояние между зондами. В том случае, когда слой имеет ограниченные размеры (реальная пластина кремния с диффузионным слоем), численный коэффициент в (3.28) рассчитывается исходя из конкретной геометрии образца.

Для определения глубины расположения $p-n$ -перехода наиболее распространенным является 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 полупроводник электронной и дырочной проводимости.

*) Сопротивление единицы площади слоя обычно обозначается Ом/□.

Различие в окрашивании может происходить либо из-за различной скорости химической реакции, либо вследствие осаждения металлов только на одну из областей p - n -перехода. Последнее обусловлено разницей электрохимических потенциалов полупроводника различного типа проводимости. Химическим окрашиванием можно установить расположение не только p - n -переходов, но и n^+ - n - и p^+ - p -переходов.

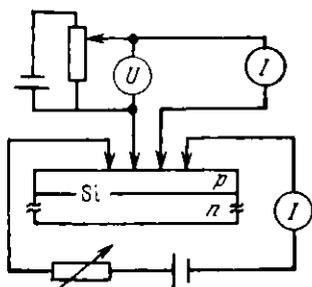


Рис. 3.17

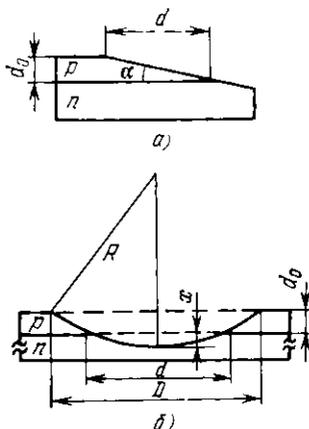


Рис. 3.18

Рис. 3.17. Схема измерения удельного сопротивления слоя четырехзондовым методом

Рис. 3.18. Поперечные сечения пластин с косым (а) и шаровым (б) шлифами

Изготовление шлифов под небольшими углами ($1-5^\circ$) позволяет расширить исследуемую диффузионную область. Поперечные сечения образцов с косым и шаровым шлифами представлены на рис. 3.18. Глубина расположения p - n -перехода при изготовлении косого шлифа под углом α и шарового (при $2R \gg x$ и $2R \gg d_0$, рис. 3.18,б) равна

$$d_0 = d \operatorname{tg} \alpha; \quad d_0 = \frac{D^2 - d^2}{4} \frac{1}{2R} = \frac{l^2}{2R}. \quad (3.29)$$

Наиболее распространенным окрасителем является травитель, состоящий из концентрированной плавиковой кислоты HF с добавлением 0,1% HNO_3 . При нанесении этого травителя на шлиф области p -типа темнеют, цвет n -областей остается неизменным. В качестве травителя может использоваться и чистая HF, но в этом случае шлиф необходимо интенсивно освещать.

Для определения поверхностной концентрации диффузионного слоя измеряют четырехзондовым методом удельное сопротивление слоя R_s и глубину залегания p - n -перехода d_0 , что позволяет определить усредненную удельную проводимость, а зная ее, рассчитать поверхностную концентрацию

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{R_s d_0} = \frac{1}{d_0} \int_0^{d_0} q \mu(N) [N(x) - N_0] dx, \quad (3.30)$$

где $N(x)$ — распределение примеси в диффузионном слое. Этот расчет выполнен на ЭВМ для двух законов распределения — по дополнительной функции ошибок $N(x) = N_s \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt})$ и функции Гаусса $N(x) = (Q/\pi Dt) \exp[-x^2/(4Dt)]$ для различных значений концентраций примеси в исходной пластине (рис. 3.19).

Для слоев, легированных ионным внедрением примесей, профили распределения внедренных атомов изучают, используя ряд физических методов. Широко распространение получил метод *масс-спектро스코пии 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 исследуемой примеси. Ионный ток пропорционален концентрации примеси в распыленном слое, а время распыления пропорционально его толщине. Поэтому зависимость ионного тока от времени эквивалентна зависимости концентрации примеси от глубины.

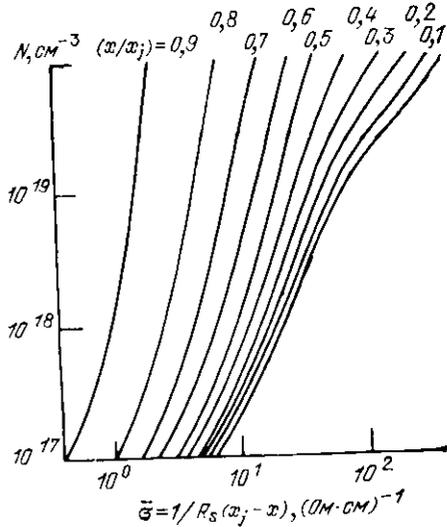


Рис. 3.19. Расчетные кривые, характеризующие концентрацию примеси в диффузионном слое (распределение примеси в соответствии с $N(x) = (Q/\sqrt{\pi Dt}) \exp(-x^2/4Dt)$, $N^0 = 10^{18} \text{ см}^{-3}$)

Глава 4

Эпитаксиальное наращивание слоев кремния

§ 4.1. Введение

Эпитаксиальным наращиванием, или эпитаксией, называют процесс ориентированного наращивания слоя вещества на исходном монокристалле — подложке. *Автоэпитаксией (гомоэпитаксией)* называют ориентированное наращивание слоя, отличающегося от подложки только примесным составом. Ориентированное наращивание вещества на инородных подложках называют *гетероэпитаксией*.

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

В настоящее время полной и строгой теории конденсации вещества при эпитаксиальном наращивании не создано. Предложено несколько возможных

механизмов ориентированного роста. Современные представления о механизме конденсации из паровой фазы и ориентированного роста сводятся к следующему. Поверхность подложки имеет определенный потенциальный рельеф, соответствующий расположению узлов ее кристаллической решетки. Для реальной поверхности строгое чередование потенциальных барьеров и ям нарушается вследствие влияния поверхностных структурных дефектов, таких как поверхностные вакансии, адсорбированные атомы и ступени, обусловленные выходом на поверхность винтовых дислокаций. Обычно эти поверхностные 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 достаточной высокой энергии повторно испаряться. Попав 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 дотраивание 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 большое значение, которое имеет характер подложки в механизме роста эпитаксиальных слоев.

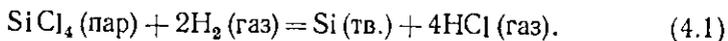
В ряде случаев конденсация и наращивание из паровой фазы осуществляются не в виде прямого перехода газовой фазы — твердая фаза, а в процессе более сложного перехода газовой фазы — жидкая фаза — твердая фаза.

§ 4.2. Автоэпитаксия кремния

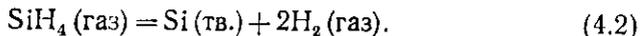
В настоящее время используются в основном три метода эпитаксиального наращивания полупроводниковых слоев: осаждение из газовой фазы; осаждение из паровой фазы; осаждение из растворов (жидкостная эпитаксия).

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

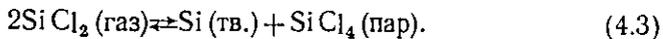
1. Восстановление водородом галогенидов полупроводников. Для галогенидов кремния такой реакцией может быть



2. Пиролитическое разложение силана



3. Реакции диспропорционирования. Примером такой реакции для соединений кремния является



В последнее время интенсивно развивается метод осаждения из паровой фазы в вакууме, получивший название *молекулярно-лучевой эпитаксии*. Метод основан на распылении кремния в глубоком вакууме ($1,33 \cdot 10^{-8}$ — $1,33 \cdot 10^{-9}$ Па).

Метод осаждения из растворов используется для гетероэпитаксии, например для выращивания арсенида галлия на германии.

Для автоэпитаксии кремния в промышленном производстве наибольшее распространение получил метод осаждения из газовой фазы на основе реакции (4.1), получивший название *хлоридного*.

4.2.1. Хлоридный метод. Установка для эпитаксиального наращивания хлоридным методом (рис. 4.1) состоит из реакционной камеры и газовой системы, обеспечивающей подачу в реакционную камеру водорода, азота, их смеси и хлористого водорода. В нее включены сосуды, содержащие жидкие тетрахлорид кремния и галогениды тех примесей, которые должны быть введены в эпитаксиальную пленку при ее наращивании. На рис. 4.2

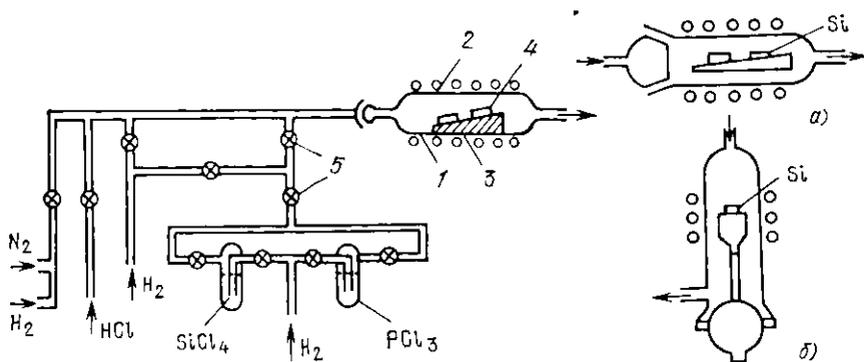


Рис. 4.1

Рис. 4.2

Рис. 4.1. Установка для эпитаксиального наращивания хлоридным методом:

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

Рис. 4.2. Типы реакционных камер для эпитаксиального наращивания:

а — горизонтальная; б — вертикальная

представлены типы реакционных камер. В горизонтальной камере пластины кремния расположены горизонтально, газовый поток направляется параллельно их поверхности; в вертикальной — пластины расположены вертикально, газовый поток направляется перпендикулярно их поверхности. Реакционные камеры изготавливаются из особо чистого переплавленного кварца. Стенки камеры охлаждают, создавая обычно водяную рубашку. Это предотвращает протекание на них химических реакций. Нагрев камеры происходит от индукционного нагревателя. Подставки для пластин кремния выполняются из графита и служат одновременно для поглощения и передачи тепла. Поскольку графит — пористый материал и очистка его сложна, при высоких температурах из графита наблюдается большое газоотделение. Чтобы исключить загрязнение атмосферы камеры как графитом, так и выделяющимися из него газами, подставки покрывают кремнием или карбидом кремния.

Химические реакции, происходящие при эпитаксиальном наращивании, относятся к гетерогенным (см. § 2.4). Первый и пятый этапы — перенос реагентов к поверхности и перенос продук-

тов 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 зависит от температуры. В целом скорость эпитаксиального наращивания контролируется наиболее медленным из этих этапов. Как видно из рис. 4.3, при низких температурах (до 1150°С) скорость наращивания повышается с ростом температуры. Здесь она слабо зависит от скорости газового потока, поэтому процесс наращивания определяется скоростью химической реакции. При температурах 1200—1300°С скорость наращивания практически не зависит от температуры. Существенное влияние скорости потока 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 процесс миграции атомов по поверхности практически отсутствует, в силу чего скорость наращивания определяется локальными свойствами поверхности в тех точках, где располагаются адсорбированные атомы. Наращивание кремния в таких условиях приводит к росту нитевидных кристаллов при температурах ниже 1000°С, беспорядочно ориентированных поликристаллов или монокристаллических слоев с большой концентрацией структурных дефектов при $T=1000\text{—}1150^\circ\text{C}$. При высокотемпературном выращивании (более 1250°С) 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. 4.4. Скорость роста увеличивается при повышении молярной концентрации SiCl_4 только при небольших ее значениях, а затем при $N_m > 0,1$ спадает из-за травления поверхности подложки, обусловленного протеканием реакции восстановления (4.1) и возможностью протекания реакции диспропорционирования (4.3). Наиболее качественные эпитаксиальные слои кремния образуются при температурах 1250—1270°С.

4.2.2. Легирование эпитаксиальных слоев. Для получения эпитаксиальных слоев с заданными свойствами проводят их легирование в процессе роста элементами III и V групп. Наиболее распространенный способ легирования состоит в получении смеси паров тетрахлорида кремния и хлорида примеси в газовой среде испарением их порознь. При этом концентрация легирующей примеси варьируется изменением температуры испарителя (содержащего хлорид примеси) и скорости водородного потока. Атомы легирующей примеси образуются в результате реакций восстановления хлоридов примеси водородом



При образовании эпитаксиальных слоев происходит интенсивное внедрение примеси, содержащейся в подложке, в эпитаксиальный слой. Это особенно заметно при наращивании высокоомных слоев на сильнолегированные подложки*. 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 выращивании высокоомных слоев очевидна, поскольку имеется градиент примеси, а процесс наращивания проводится при высоких температурах.

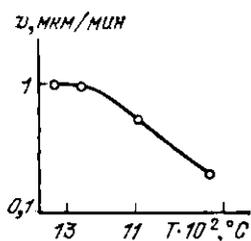


Рис. 4.3

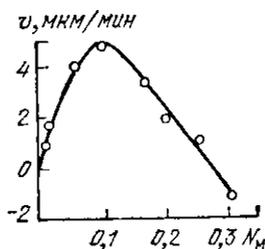


Рис. 4.4

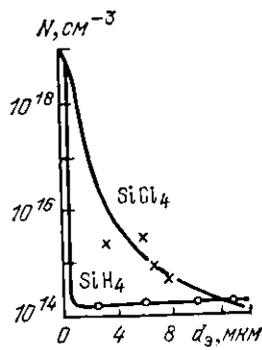


Рис. 4.5

Рис. 4.3. Зависимость скорости наращивания эпитаксиального слоя от температуры

Рис. 4.4. Зависимость скорости наращивания эпитаксиального слоя от молярной концентрации SiCl_4 в газовом потоке

Рис. 4.5. Распределение примесей в эпитаксиальном слое для хлоридного и силанового методов наращивания

При автолегировании внедрение примеси из подложки в растущий эпитаксиальный слой обусловлено травлением подложки (при реакции диспропорционирования или при реакции с хлористым водородом). В результате 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. 4.5 представлено распределение примеси в эпитаксиальном слое, выращенном на подложке n^+ -типа. Для сравнения предоставлено распределение примеси в эпитаксиальном слое, полученном методом разложения силана. Низкая температура процесса на основе разложения и отсутствие автолегирования поз-

* Примером могут служить биполярные ИС, в которых эпитаксиальный n -слой наращивается на сильнолегированный «скрытый» n^+ -слой (см. рис. 1.2).

воляют получить для этого метода более резкие концентрационные перепады*.

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 при получении эпитаксиальных слоев с высоким совершенством кристаллической структуры, с одной стороны, и резким концентрационным профилем на границе с подложкой, с другой, необходимо обеспечить выполнение противоречивых требований к температурному режиму процесса. Это противоречие устраняется применением двухстадийного процесса. Первая стадия — очень кратковременный нагрев подложки (в течение 15—20 с) до температур 1300—1350° С. В это время на поверхности подложки образуется равномерная пленка жидкой фазы, которая сохраняется и в течение второй стадии процесса, проводимой при температурах 1150—1200° С.

Образование жидкой фазы приводит к тому, что кремний и легирующая примесь, образовавшиеся в результате реакции восстановления, растворяются в жидкой фазе. Из-за пересыщения жидкой фазы кремнием происходит его выделение на границе раздела жидкой и твердой фаз. Растущий благодаря этому выделению эпитаксиальный слой имеет совершенную структуру и при более низких температурах. Понижение же температуры процесса ослабляет перераспределение примеси на границе подложка — эпитаксиальный слой.

§ 4.3. Гетероэпитаксия кремния на сапфире

Гетероэпитаксия по сравнению с автоэпитаксией является более общим процессом, поскольку соответствует закономерному срастанию двух веществ различного химического состава, имеющих различную кристаллическую структуру и физические свойства. Эти различия срастающихся веществ обуславливают нарушение непрерывности кристаллической системы и несоответствие в расположении атомов по обе стороны от поверхности раздела. В силу этого 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 Si имеют различную кристаллическую структуру. Поэтому основным вопросом, который встает при проведении гетероэпитаксии, является установление тех кристаллографических плоскостей сапфира, на которых можно наиболее

*) Основной причиной достаточно узкого использования метода наращивания эпитаксиальных слоев на основе реакции разложения силана является взрывоопасность процесса, поскольку силан самовоспламеняется при соприкосновении с воздухом и работа с этим газом требует особых мер безопасности.

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 поверхностной плоскости сапфира совпадала с плотностью упаковки атомов в плоскости кремния заданной ориентации, а симметрия расположения атомов в этих плоскостях, была бы по возможности близкой. В наибольшей мере этим условиям удовлетворяет следующее сочетание кристаллографических плоскостей: $\text{Si}(111) \parallel \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(0001)$; $\text{Si}(100) \parallel \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(01\bar{1}2)$; $\text{Si}(110) \parallel \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3(01\bar{2}0)$.

Хлоридный метод, широко используемый для автоэпитаксии кремния, непригоден для гетероэпитаксии из-за активного взаимодействия хлоридов с сапфировой подложкой. Поэтому основным методом получения гетероэпитаксиальных слоев кремния на сапфире (КНС) является осаждение из газовой фазы на основе реакции пиролизического разложения силана.

Промышленные установки для получения структур типа КНС аналогичны установкам, предназначенным для хлоридного метода. Для исключения самовоспламенения силана на воздухе используются газовые смеси водорода и силана с низким содержанием последнего (максимально допустимая концентрация силана в водороде 4% по объему).

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. Нарушенный слой удаляется травлением в полирующих высокотемпературных травителях и высокотемпературным отжигом.

§ 4.4. Методы изучения параметров эпитаксиальных слоев

Наибольший интерес представляет измерение толщины и удельного сопротивления эпитаксиальных слоев. Для определения толщины эпитаксиального слоя используется метод косо́го шлифа с последующим окрашиванием, позволяющим выявить границы слоя в p – n -, n^+ – n -, p^+ – p -структурах. Этот метод аналогичен используемому при изучении диффузионных слоев (гл. 3).

Другой 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 ре-

зультате возникает локализованная область, кристаллически не согласующаяся с окружающим ее материалом эпитаксиальной пленки. Схематическое изображение дефекта упаковки в эпитаксиальном слое на подложке с ориентацией (111) представлено на рис. 4.6. Обработка в селективных травителях позволяет выявить выход дефекта упаковки на поверхность слоя в виде характерной фигуры травления [равносторонний треугольник для плоскости (111)]. Толщина эпитаксиального слоя d_s связана с длиной стороны треугольника L соотношением $d_s = LV\sqrt{2/3} = 0,816L$. 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 изменяется. Однако в любом случае с помощью простых геометрических соотношений можно установить связь между размером отдельных элементов фигур и толщиной эпитаксиального слоя.

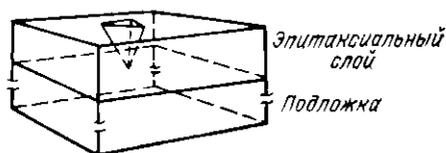


Рис. 4.6. Изображение дефекта упаковки в эпитаксиальном слое с ориентацией (111)

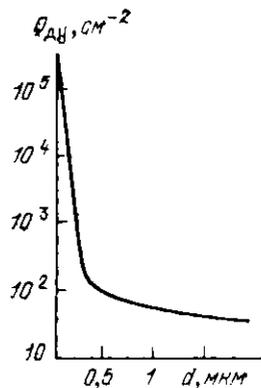


Рис. 4.7. Зависимость плотности дефектов упаковки в эпитаксиальном слое от толщины слоя, удаляемого при газовом травлении

Для измерения удельного сопротивления эпитаксиальных слоев разработан ряд методов. *Четырехзондовый метод*, описанный в § 3.6, используется для определения удельного сопротивления эпитаксиальных $p-n$ - и $n-p$ -структур. При необходимости исследования n^+-n - и p^+-p -структур в реактор для эпитаксиального наращивания помещаются наряду с n^+ (или p^+ -) подложками эталонные высокоомные подложки противоположного типа проводимости. По измерению удельного сопротивления этих эталонных образцов устанавливаются удельное сопротивление эпитаксиального слоя рабочих структур. *Трехзондовый метод* используется для измерения эпитаксиальных n^+-n - и p^+-p -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 удельно-

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

Важной характеристикой эпитаксиальных слоев является количество дефектов упаковки. Основными причинами возникновения структурных дефектов являются механические повреждения поверхности подложки и наличие на ней посторонних примесей. Эпитаксиальный слой, выращенный на подложке, подвергавшейся только механической обработке, содержит 10^7 см⁻² дефектов упаковки. Стравливание механически нарушенных и напряженных слоев газовым травлением (см. § 2.3) снижает количество дефектов упаковки до 10^2 см⁻². Зависимость числа дефектов упаковки от толщины слоя, удаляемого при газовом травлении, представлена на рис. 4.7. Если слой выращен на подложке, не имеющей механических повреждений, то основной причиной появления дефектов являются примеси на поверхности. Так, присутствие кислорода в газовом потоке в количестве $7,5 \cdot 10^{-3}\%$ приводит к образованию дефектов упаковки до 10^5 см⁻². Присутствие паров воды в количестве $10^{-2}\%$ приводит к образованию поликристаллических слоев вместо эпитаксиальных.

Глава 5

Получение тонких пленок

§ 5.1. Введение

В современной технологии изготовления интегральных микросхем тонкие пленки (толщиной до 5 мкм) нашли широкое применение и выполняют разнообразные функции. В полупроводниковых ИС тонкие диэлектрические пленки используются как маскирующие покрытия для получения локализованных легированных областей. Они выполняют также защитную роль, предохраняя выход $p-n$ -перехода на поверхность кремния от воздействия окружающей среды во всех этапах изготовления схемы. В дальнейшем защитные пленки обеспечивают стабильность электрических характеристик ИС в процессе ее эксплуатации. В ИС, построенных на МДП-транзисторах, диэлектрические пленки, кроме указанных выше функций, создают еще электрическую изоляцию затвора. Тонкие пленки металлов в ИС используются для контактных областей и межсоединений.

В тонкопленочных ИС на основе самих пленок образуются пассивные элементы. При этом применяются тонкие пленки из материалов с высокой электропроводностью, диэлектрические и резистивные пленки. Тонкие диэлектрические пленки создают электрическую изоляцию между различными слоями в схемах с много-

уровневой металлизацией. Нанесенные на поверхность готовой схемы, они защищают ее от механических повреждений. Тонкие пленки металлов связывают активные и пассивные элементы, образуют контактные площадки. Кроме того, в полупроводниковых и тонкопленочных ИС пленки используются как технологические элементы в процессе изготовления схем, например в качестве контактных масок при диффузии и напылении.

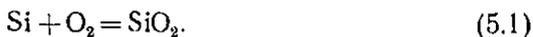
Существует много методов получения тонких пленок: термическое окисление кремния, вакуумное термическое напыление, ионно-плазменное напыление и др. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки в зависимости от материала пленки и ее назначения.

§ 5.2. Термическое окисление кремния

Основное назначение пленок двуокиси кремния в планарной технологии ИС состоит в их маскирующих и защитных функциях. Пособлужку при выполнении и тех, и других функций пленки SiO_2 располагают непосредственно на поверхности кремния, для их создания можно использовать метод диффузии кислорода или паров воды в кремний. В результате этой диффузии и химических реакций окисления на поверхности кремния образуется пленка SiO_2 . Так как процессы идут при высокой температуре, метод получил название термического окисления.

5.2.1. Законы роста пленок SiO_2 . Процесс термического окисления включает диффузию окислителя из газовой среды к поверхности кремния, химическую реакцию окисления кремния на его поверхности с образованием пленки SiO_2 , диффузию окислителя через уже выросший слой двуокиси кремния и химическую реакцию на границе раздела $\text{SiO}_2 - \text{Si}$. Данные процессы могут быть охарактеризованы тремя потоками окислителя — в газовой среде, в пленке SiO_2 и на границе $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ при химической реакции. Расчетом этих потоков получают законы роста толстых (примерно более 0,1 мкм) пленок SiO_2^* . Толстые пленки растут сначала по линейному $x = C_1 t$, а затем по параболическому $x^2 = C_2 t$ законам, где x — толщина пленки; t — время роста. Численные значения констант C_1 и C_2 зависят от типа окислителя. Обычно в качестве окислителя используют либо сухой кислород, либо смесь кислорода и паров воды. Окисляемые пластины кремния помещаются в открытую кварцевую трубу, проходящую через высокотемпературную печь (1000—1250° С). В трубе создается поток окислителя.

При окислении в сухом кислороде происходит реакция



* При росте тонких пленок существенную роль играет электрическое поле, возникающее за счет электронного обмена между адсорбированными молекулами окислителя и поверхностью кремния.

Присутствие паров воды приводит к реакции



Скорости роста пленок SiO_2 в этих окислителях существенно различны: скорость роста в парах воды более высокая. Это может быть связано с большим различием в значениях предельной концентрации окислителя в SiO_2 , которые для кислорода и паров воды соответственно составляют $5 \cdot 10^{16}$ и $3 \cdot 10^{19}$ см⁻³. На рис. 5.1 представлены зависимости толщины окисла от времени проведения процесса и от температуры для окисления в сухом кислороде и парах воды.

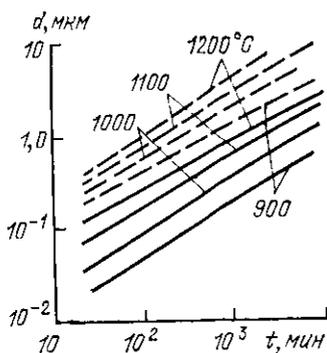


Рис. 5.1

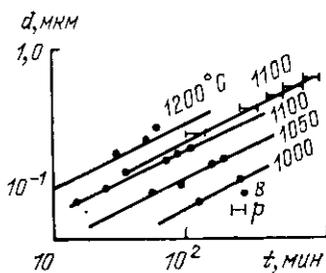


Рис. 5.2

Рис. 5.1. Зависимость толщины пленки SiO_2 от времени окисления в сухом кислороде и парах воды:

— — — сухой кислород; - - - пары воды

Рис. 5.2. Зависимость толщины пленок SiO_2 , необходимой для защиты от диффузии бора и фосфора, от времени и температуры процесса диффузии

При выращивании пленок SiO_2 обычно чередуют сухой кислород с влажным. Выращивание пленок во влажном кислороде ускоряет процесс получения пленки SiO_2 заданной толщины. Проведение процесса в сухом кислороде улучшает электрические и защитные свойства пленок благодаря удалению воды, уплотнению пленки, выращенной во влажном кислороде, и снижению объемного заряда в пленке.

5.2.2. 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 10^{15} — 10^{16} Ом·см, диэлектрическая прочность 10^6 — 10^7 В/см.

Маскирующие свойства пленок SiO_2 определяются коэффициентами диффузии основных донорных и акцепторных примесей в SiO_2 и Si (табл. 5.1). Необходимо учитывать, что приведенные данные следует считать ориентировочными, поскольку коэффициенты диффузии сильно зависят как от условий получения SiO_2 , так и от условий проведения процессов диффузии.

Т а б л и ц а 5.1. Коэффициенты диффузии примесей в Si и SiO₂
(при T=1150°C)

Коэффициент диффузии для, см ² /с	Примесь			
	Sb	P	B	Ga*
SiO ₂	10 ⁻¹⁴	2,1·10 ⁻¹⁵	1,2·10 ⁻¹⁶	5,3·10 ⁻¹¹
Si	9·10 ⁻¹⁴	1,3·10 ⁻¹²	1,3·10 ⁻¹²	6,1·10 ⁻¹³

* Коэффициенты диффузии приведены для T=1100°С.

На рис. 5.2 представлены экспериментально полученные зависимости, позволяющие установить толщины окислов, защищающих от диффузии бора и фосфора для различных режимов ее проведения.

5.2.3. Перераспределение примесей на границе Si—SiO₂. При термическом окислении на поверхности кремния образуется либо истощенный, либо насыщенный примесью слой благодаря уходу части примеси в образующийся окисел или, наоборот, отталкиванию примеси окислом и накапливанию ее в приповерхностном слое кремния. Истощение или накопление примеси в приповерхностном слое кремния зависит от *коэффициента распределения (сегрегации)* примеси между двумя фазами (Si и SiO₂). Этот коэффициент (*k*) определяется как отношение концентрации примеси в Si к концентрации примеси в пленке SiO₂.

В табл. 5.2 представлены ориентировочные значения *k*. Как видим, для бора и алюминия *k*<1, а для других элементов *k*>1. Концентрационные профили в Si и SiO₂ для двух этих случаев представлены на рис. 5.3.

Т а б л и ц а 5.2. Коэффициент распределения примесей между Si и SiO₂

Примесь	Коэффициент распределения
Ga	10 ³
In	10 ³
B	3·10 ⁻¹
Al	10 ⁻³
P	10
As	10 ³

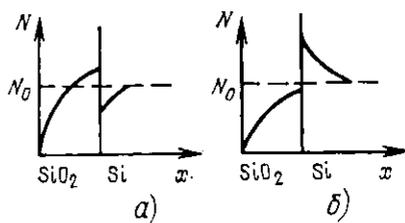


Рис. 5.3. Концентрационные профили в SiO₂ и Si для различных коэффициентов распределения:

а) *k*<1; б) *k*>1

Перераспределение примесей на границе Si—SiO₂ может сказаться на распределении примесей в структурах создаваемых приборов при одновременном проведении процессов диффузии и окисления. Если исходный кремний легирован донорными и акцепторными примесями и концентрации этих примесей не сильно отличаются друг от друга (т. е. материал имеет большое удель-

ное 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».

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

§ 5.3. Вакуумное термическое напыление

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

5.3.1. Устройство установок для вакуумного термического напыления. В современных установках для вакуумного напыления (рис. 5.4) замкнутая (рабочая) камера образуется под колпаком из нержавеющей стали, расположенным на опорной плите. Вакуумно-плотное соединение основания колпака с опорной плитой достигается с помощью резиновой прокладки. Диаметр рабочей камеры 500 мм, высота колпака 450—650 мм. Предельное давление остаточных газов $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па.

В рабочей камере размещена технологическая оснастка: держатель и нагреватель подложки, испаритель напыляемого вещества, управляемая от электромагнита заслонка для прерывания

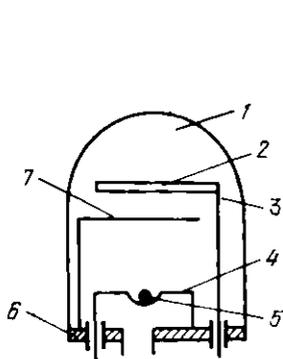


Рис. 5.4

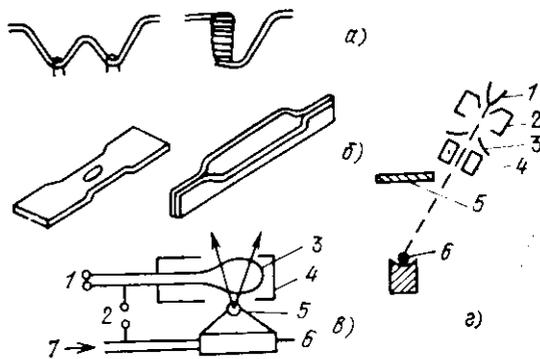


Рис. 5.5

Рис. 5.4. Схема установки для вакуумного испарения:

1 — рабочая камера; 2 — подложка; 3 — держатель подложки; 4 — испаритель; 5 — испаряемое вещество; 6 — опорная плита; 7 — заслонка

Рис. 5.5. Типы испарителей:

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

потока напыляемого вещества, вводы электропитания. 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 каруселей позволяет, испаряя различные вещества с разных испарителей, получать многослойные тонкие пленки. Для нагрева напыляемого вещества в основном используются два типа испарителей: прямоточные проволочные и ленточные испарители, изготовленные из тугоплавких материалов; электронно-лучевые испарители с нагревом испаряемого вещества электронной бомбардировкой. Возможные типы испарителей, применяемых при вакуумном напылении, представлены на рис. 5.5.

Специальный испаритель 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° С) 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 от 100 до 400° С.

5.3.2. Факторы, влияющие на толщину пленки. Толщина пленок, полученных методом вакуумного напыления, зависит от эмиссионных свойств источника, характеризующих распределение в пространстве потока испаряемого вещества, от геометрических размеров и местоположения подложки относительно источника, 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 вещество испаряется с одинаковой скоростью G , г/см²·с, во всех направлениях. Количество вещества, проходящего внутри телесного угла $d\omega$ в любом направлении в единицу времени,

$$dG = (AG/4\pi) d\omega, \quad (5.3)$$

где A — поверхность сферы.

Рассмотрим случай, когда испаряемый материал поступает на площадку dS , наклоненную к направлению потока паров под углом θ (рис. 5.6). Количество вещества, попадающего на dS ,

$$dG' = (AG \cos \theta / 4\pi l^2) dS, \quad (5.4)$$

где l — расстояние от источника до площадки dS .

Толщина пленки, образующейся за единицу времени, при испарении из точечного источника

$$d = AG \cos \theta / (4\pi l^2 \rho_{пл}), \quad (5.5)$$

где $\rho_{пл}$ — плотность испаряемого материала.

Поверхностный источник представляет собой малую площадку, с одной стороны которой с единицы площади в единицу времени испаряется Gg вещества. В этом случае количество вещества, проходящего в единицу времени в телесном угле $d\omega$, образующем угол φ с нормалью к поверхности источника,

$$dG = (AG/\pi) \cos \varphi d\omega. \quad (5.6)$$

Если испаряемый материал поступает на площадку dS , наклоненную к направлению потока паров под углом θ (рис. 5.7), то для поверхностного источника количество вещества, попадающего на площадку dS ,

$$dG' = (AG \cos \theta \cos \varphi / \pi l^2) dS, \quad (5.7)$$

а толщина пленки, образующейся за единицу времени, при испарении из поверхностного источника

$$d = AG \cos \theta \cos \varphi / (\pi l^2 \rho_{пл}). \quad (5.8)$$

Однородное по толщине покрытие достигается при точечном источнике на внутренней поверхности сферы (если источник расположен в ее центре), а при поверхностном источнике на внутренней поверхности сферы, если источник представляет собой часть поверхности этой же сферы.

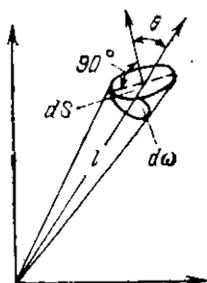


Рис. 5.6

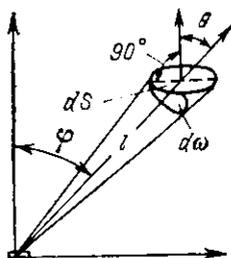


Рис. 5.7

Рис. 5.6. Испарение из точечного источника

Рис. 5.7. Испарение из поверхностного источника

В практике изготовления ИС пленки напыляются не на сферические, а на плоские подложки. Поэтому для получения однородной по толщине пленки необходимо уменьшать угол θ , увеличивая расстояние от источника напыляемого вещества до подложки. Например, если на подложке диаметром 100 мм разброс по толщине пленки должен находиться в пределах 10%, то необходимо удалить подложку от источника на расстояние не менее 200 мм.

5.3.3. Факторы, влияющие на чистоту пленки. Пленка загрязняется в результате 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 и составляющих остаточного газа. Конденсирующиеся на подложке молекулы этих соединений, а также молекулы остаточного газа включаются в растущую пленку, изменяя ее электрофизические свойства.

Для уменьшения загрязненности напыляемой пленки необходимо выполнение двух условий: понижение вероятности соударений молекул в вакуумном пространстве и увеличение потока мо-

лекул испаряемого вещества, бомбардирующих подложку, по сравнению с потоком молекул остаточных газов.

Вероятность соударения молекул в вакуумном пространстве определяется соотношением

$$\kappa = 1 - \exp(-l/L), \quad (5.9)$$

где l — расстояние между испарителем и подложкой; L — средняя длина свободного пробега молекул, см. Согласно кинетической теории газов

$$L = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \approx \frac{6 \cdot 10^8}{p}, \quad (5.10)$$

где d — эффективный диаметр молекул; p — давление в вакуумной камере. Если проводить процесс напыления при давлении $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па ($L = 60$ м) и расстояниях испаритель — подложка 10—30 см, 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 , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, к потоку молекул напыляемого вещества v_v , поступающих на подложку. Поток остаточного газа (число молекул, поступающих за единичное время на единичную площадку)

$$v_r = 3,51 \cdot 10^{22} p_r (1/M_r T_r)^{1/2}. \quad (5.11)$$

Здесь p_r , M_r и T_r — соответственно давление, молекулярная масса и температура остаточного газа.

Согласно кинетической теории газов поток испаряемого вещества в вакууме v_v определяется выражением, аналогичным (5.11), если заменить давление газа p_r на равновесное давление насыщенных паров испаряемого вещества p_v . Поток молекул, поступающих на подложку $v_{v,п}$, будет зависеть от эмиссионных свойств испарителя и, например, для точечного источника в соответствии с (5.4) будет равен

$$v_{v,п} = A v_v \cos \theta / (4 \pi l^2). \quad (5.12)$$

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 $T_{п}$ и от энергии связи между адсорбированными молекулами и молекулами подложки E_c^* :

$$\tau = \tau_0 \exp(E_c/kT_{п}), \quad (5.13)$$

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

Таким образом, среднее число газовых молекул на единице площади будет определяться произведением $v_r \tau_r$, а число молекул испаряемого вещества — произведением $v_{v,п} \tau_v$, где τ_r и τ_v — их времена жизни соответственно. Степень загрязненности пленки можно характеризовать отношением этих количеств δ , которое для точечного источника равно

$$\delta = \frac{v_r \tau_r}{v_{v,п} \tau_v} = \frac{p_r (T_r M_r)^{-1/2} \exp(E_{c,r}/kT_{п})}{p_v (T_v M_v)^{-1/2} \exp(E_{c,v}/kT_{п})} \frac{4 \pi l^2}{A \cos \theta}. \quad (5.14)$$

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

*) Рассматривается физическая адсорбция молекул.

Уменьшить загрязненность напыляемой пленки можно использованием форсированного режима испарения. Как показывает зависимость давления пара от температуры (рис. 5.8), превышение температуры над его температурой испарения* на 15—30% приводит к возрастанию примерно на порядок давления пара. Следовательно, использование такого режима позволяет на порядок увеличить поток испаряемого вещества, что в конечном счете приводит к уменьшению загрязненности пленки молекулами остаточных газов.

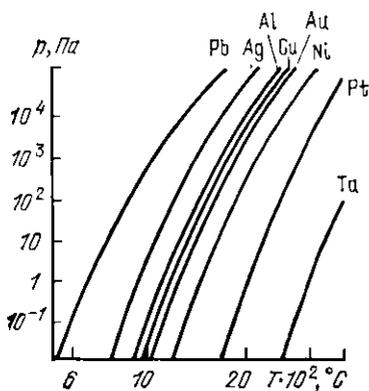


Рис. 5.8

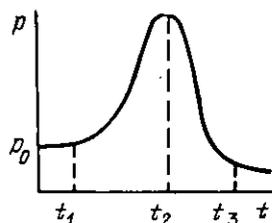


Рис. 5.9

Рис. 5.8. Зависимость давления пара от температуры для различных элементов

Рис. 5.9. Изменение давления в рабочей камере со временем:

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

Стремясь снизить загрязненность пленки, следует учитывать, что давление остаточных газов не сохраняется постоянным в процессе распыления. Изменение давления со временем представлено на рис. 5.9. Давление p_0 характеризует состояние вакуумной камеры перед началом процесса распыления. В момент t_1 включается испаритель. Давление остаточных газов возрастает в силу газовыделения из нагретых частей арматуры. Начиная с момента t_2 давление остаточных газов снижается. Это снижение обусловлено геттерирующими 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.

* Температурой испарения принято считать температуру, при которой давление пара вещества над его поверхностью составляет 1,333 Па.

§ 5.4. 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 приудительна (например, нагрев катода, облучение его ультрафиолетовым светом), то такой разряд является *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 столкновения электронов с молекулами газа являются ионизирующими. Возникающие ионы ускоряются электрическим полем и движутся по направлению 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, которая поддерживает самостоятельный тлеющий разряд. Структура этого разряда и распределение потенциала между электродами представлены на рис. 5.10. В *темном катодном пространстве* происходит ускорение положительных ионов, бомбардирующих катод. За счет передачи энергии этих ионов атомам катода происходит распыление материала катода.

5.4.1. Двухэлектродные системы напыления. В наиболее простых установках для ионно-плазменного напыления мишень из распыляемого материала является катодом, а держатель подложки — анодом*. Такие системы принято называть *двухэлектрод-*

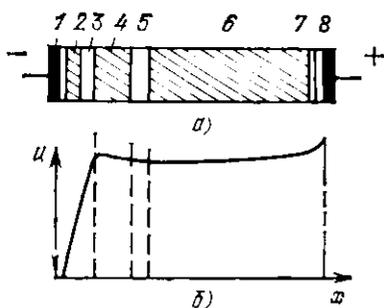


Рис. 5.10

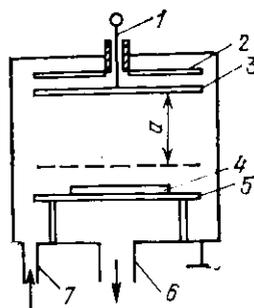


Рис. 5.11

Рис. 5.10. Структура тлеющего разряда (а) и распределение потенциала между электродами (б):

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

Рис. 5.11. Схема двухэлектродной установки ионно-плазменного распыления:

1 — высоковольтный ввод; 2 — экран; 3 — катод; 4 — подложка; 5 — анод; 6 — выход к откачной системе; 7 — натекатель для аргона

*) В этом случае ионно-плазменное напыление называют катодным.

ными (рис. 5.11). Для эффективного осаждения распыленных атомов на подложку она должна располагаться достаточно близко к катоду. Обычно расстояние между катодом и подложкой составляет полторы-две длины темного катодного пространства. Чтобы исключить распыление обратной стороны мишени, где располагаются охлаждающие системы, устройства для крепления деталей, используются металлические экраны, имеющие потенциал анода и располагаемые от катода на расстоянии, меньшем длины темного катодного пространства. Основными факторами, определяющими скорость напыления, являются напряжение и ток разряда, давление газа, концентрация примесей в рабочем газе и температура подложки.

При увеличении энергии ионов с ростом напряжения между электродами возрастает вероятность того, что один ион удалит несколько атомов с поверхности катода. Число атомов, удаленных с поверхности одним ионом, называют *коэффициентом распыления*. Коэффициент распыления характеризует скорость напыления пленки на подложку. При напряжениях на катоде, превышающих 3 кВ, увеличение скорости напыления становится незначительным. 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 повышенным давлением.

Однако при значительном увеличении давления скорость напыления начинает быстро спадать. Это обусловлено двумя явлениями, происходящими в тлеющем разряде: *обратной диффузией* распыленного материала к мишени (которая, как установлено, наблюдается при давлениях, превышающих приблизительно 17,3 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 вносят большой вклад в протекающий ток, 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 2 раза.

При увеличении температуры подложки наблюдается заметное уменьшение 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 испускаются под малыми углами к поверхности катода и испытывают столкновения с атомами газа, могут не попасть на подложку. С увеличением расстояния между катодом и подложкой вероятность этого возрастает. Экспериментальные исследования показывают увеличение толщины пленки на краях подложки. Это можно объяснить возрастанием скорости распыления на краях мишени вследствие изменения траекторий движения ионов (рис. 5.12), 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 (угловой эффект).

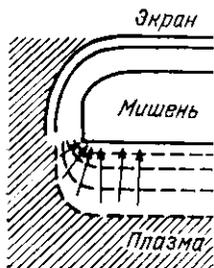


Рис. 5.12

Рис. 5.12. Изменение траектории движения ионов на краях мишени

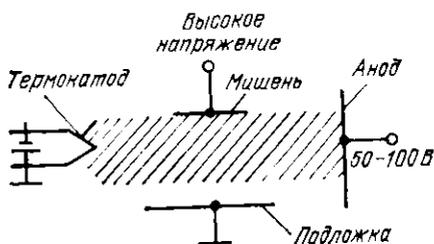


Рис. 5.13

Рис. 5.13. Трехэлектродная система ионно-плазменного распыления

Основным источником загрязнения пленок является фоновая атмосфера. Ее возникновение обусловлено теми же факторами, с которыми связано появление остаточных газов при вакуумном напылении*. Здесь также используется заслонка как средство борьбы с загрязнением пленки. Однако при ионном распылении 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.

*) В процессе ионного напыления первоначально в газоразрядной камере получают высокий вакуум, а затем устанавливают требуемое давление рабочей камеры.

5.4.2. Трехэлектродные системы напыления. Если, сохраняя высокую плотность тока, исключить явления перезарядки ионов и обратной диффузии, то можно увеличить скорость распыления. Этого можно достичь, используя давления газа, при которых 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 достижении ею анода разряд прекращается даже при значительном повышении напряжения между электродами. Для большинства систем распыления это происходит при давлениях около 1,3—2,6 Па.

Поддержать разряд при меньших давлениях можно при двух условиях: при наличии кроме вторичной эмиссии дополнительного источника электронов; при повышении эффективности ионизации газа имеющимся числом электронов. Выполнить эти условия можно в трехэлектродных системах распыления (рис. 5.13). В этих системах дополнительные электроны получают термоэмиссией с нагретого катода. Между катодом и анодом возникает *дуговой разряд*. Эмиттируемые электроны в атмосфере газа 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 же трехэлектродной системе, используя магнитные поля, можно повысить 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, в то время как в двухэлектродных системах распыление происходит при давлении 4—6,6 Па. 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 представляет собой химическое соединение материала мишени и газа. В технологии ИС реактивное распыление используется для получения диэлектрических пленок окислов, нитридов и других соединений.

5.4.3. Высокочастотное напыление диэлектриков. Рассмотренные системы позволяют распылять только металлы. Если материал мишени — диэлектрик или полупроводник с высоким сопротивлением, то на мишени возникает заряд положительных ионов, препятствующий ее дальнейшей бомбардировке. Влияние положительного заряда можно предотвратить, подавая на электроды переменное напряжение. В ту часть периода, когда напряжение на мишени отрицательно, происходит ее распыление, сопровождается 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 установления 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 ВЧ напряжения и большого различия в подвижности электронов и ионов до соответствующих электродов успевает дойти большое число электронов и существенно меньшее ионов. В силу этого плазма заряжается положительно относительно электродов и возникающая разность потенциалов оказывается достаточной для бомбардировки и распыления.

Использование ВЧ 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 ВЧ, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации атомов газа.

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

5.4.4. Основные особенности и преимущества ионно-плазменного напыления. Системы, аналогичные рассмотренным, могут применяться не только для получения тонких пленок на подложках, но и для ионного травления материалов, которое в последнее время стало находить широкое применение в производстве ИС. При этом подложки, подлежащие травлению, используются в качестве

катода. Металлы можно травить при постоянном напряжении, а диэлектрики — при ВЧ. Более детально ионное травление будет рассмотрено в гл. 9.

При ионно-плазменном напылении 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.

Преимуществом метода является разнообразие материалов получаемых пленок — диэлектрики, металлы, в том числе и тугоплавкие, многокомпонентные соединения.

Высокие энергии распыленных атомов способствуют 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 важным условием повышения скоростей напыления является охлаждение мишеней.

§ 5.5. Методы определения толщины пленок

Методы определения толщины пленок весьма разнообразны. Гравиметрические методы (*микровзвешивание, метод кварцевого резонатора*) основаны на измерении масс тонкопленочных покрытий, 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 важное значение в технологии микронэлектронных приборов приобрела так называемая *эллипсометрия*. Используются также электрические методы (в основном контроль электрического сопротивления для проводящих пленок и емкости для диэлектрических) и ряд других.

Свойства тонких пленок очень чувствительны к технологии их изготовления. Пленки, имеющие одинаковую толщину, в зависимости от условий их получения могут иметь совершенно различные удельные сопротивления, температурные коэффициенты сопротивления, диэлектрические потери, коэффициенты поглощения света и т. п. Поэтому в технологии ИС часто более важно не измерение толщины пленки после ее получения, а возможность управлять толщиной в процессе нанесения.

5.5.1. Метод кварцевого вибратора. Основан на измерении отклонения резонансной частоты пьезоэлектрического кварцевого вибратора. Отклонение обусловлено изменением массы кварцевой пластины при напылении на нее тонкой пленки. Пьезоэлектрические свойства пластин 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-резонансом*. Его резонансная частота

$$f_0 = (n/2d) (C/\rho)^{1/2}, \quad (5.15)$$

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

$$\Delta d = m \Delta f / (\rho_{пл} A f_0). \quad (5.16)$$

Поскольку все параметры, входящие в (5.16), 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. Для измерения Δf используется дифференциальный метод.

5.5.2. 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 измерение этих параметров можно производить непосредственно в технологическом процессе, то напылительные системы с измерением параметров пленок, основанном 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 рядом с рабочей подложкой помещается 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

$$d = \rho a / (R_s b), \quad (5.17)$$

где ρ — удельное сопротивление наносимого материала; R_s — удельное сопротивление слоя пленки; a и b — длина и ширина пленки.

Недостатком метода является отсутствие точных данных об удельном сопротивлении, которое для пленок может существенно

*) Название среза соответствует принятому стандарту.

отличаться от сопротивления объемного образца и иметь значительный разброс в зависимости от технологии нанесения. Поэтому системы с таким методом контроля целесообразно использовать при изготовлении резисторов в тонкопленочных ИС, когда наиболее важным параметром является не столько толщина пленки, сколько сопротивление R_s .

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 такой конструкции, что его емкость изменяется при нанесении на поверхность конденсатора 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. Изменения емкости составляют в зависимости от толщины наносимой пленки от десятых долей до единиц процентов ее первоначальной величины. Толщина пленки определяется этим приращением емкости как $\Delta C/K$. Здесь K — постоянная, зависящая от диэлектрической проницаемости и конструктивных параметров контрольного конденсатора.

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

5.5.3. 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 и перпендикулярная плоскости падения) отражаются по-разному, в результате чего после отражения излучение оказывается эллиптически поляризованным. Измерив эллиптичность отраженной волны, можно определить свойства пленки, вызвавшей изменение поляризации.

Результирующие значения амплитуды всех пучков света, отраженного от двух границ раздела пленка — воздух и подложка — пленка (рис. 5.14), для параллельной и перпендикулярной составляющих равны*)

$$R_p = \rho_p e^{i\Delta_p} = \frac{r_{12p} + r_{23p} e^{-2i\delta}}{1 + r_{12p} r_{23p} e^{-2i\delta}}; \quad (5.18)$$

*) Индексы p и s относятся соответственно к параллельной и перпендикулярной составляющим излучения.

$$R_s = \rho_s e^{i\Delta_s} = \frac{r_{12s} + r_{23s} e^{-2i\delta}}{1 + r_{12s} r_{23s} e^{-2i\delta}},$$

где ρ_p и ρ_s — амплитуды параллельной и перпендикулярной составляющих излучения; Δ_p и Δ_s — их фазы; r_{12p} и r_{12s} , r_{23p} и r_{23s} — коэффициенты отражения Френеля от пленки и подложки, определяемые их показателями преломления и углом падения излучения θ ;

$$\delta = (360 d/\lambda) (n_2^2 - \sin^2 \theta_1)^{1/2} \quad (5.19)$$

— изменение фазы, вызванное прохождением луча света через пленку толщиной d . Состояние поляризации характеризуется отношением $\operatorname{tg} \Psi = \rho_p/\rho_s$ и разностью фаз $\Delta = \Delta_p - \Delta_s$. Основное уравнение эллипсометрии имеет вид

$$\operatorname{tg} \Psi e^{i\Delta} = \frac{\rho_p}{\rho_s} e^{i(\Delta_p - \Delta_s)}. \quad (5.20)$$

Зная оптические параметры подложки и экспериментально определив значения $\operatorname{tg} \Psi$ и Δ , из (5.20) можно найти показатель преломления и толщину пленки d .

Для кремния при $\lambda = 0,5461$ мкм комплексный коэффициент преломления $n_1 = 4,050 - 0,028 i$. Для данного 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. 5.15.

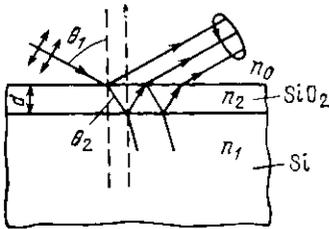


Рис. 5.14. Ход лучей линейно-поляризованного света при отражении от поверхности подложки, покрытой пленкой SiO_2

Поставленные у кривых цифры соответствуют различным показателям преломления пленки n_2 . Толщина пленки определяется по приращению δ , которое изменяется вдоль каждой кривой от 0 до 180° . 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. 5.15, позволяют после экспериментального установления значений Ψ и Δ из эллипсометрических измерений определить показатель преломления и толщину исследуемой пленки, нанесенной на поверхность кремния.

Схема эллипсометра представлена на рис. 5.16. Эллипсометр представляет собой установку, позволяющую поляризовать монохроматический свет под определенным углом относительно плоскости падения и направлять его также под определенным углом к поверхности подложки с исследуемой пленкой, а также измерять эллиптичность поляризованного света и ориентацию его главных осей относительно плоскости падения. Он содержит источник света с фильтром, обеспечивающим монохроматичность^{*}. Поляриза-

^{*} При использовании лазера в качестве источника света эллипсометры называют лазерными.

тор и анализатор можно вращать с точным фиксированием углов вращения. Быстрая ось четвертьволновой фазовой пластины (компенсатора) установлена под углом 45° к плоскости падения света. Детектором отраженного излучения может служить фотодиод. Вращением поляризатора добиваются такой эллиптичности све-

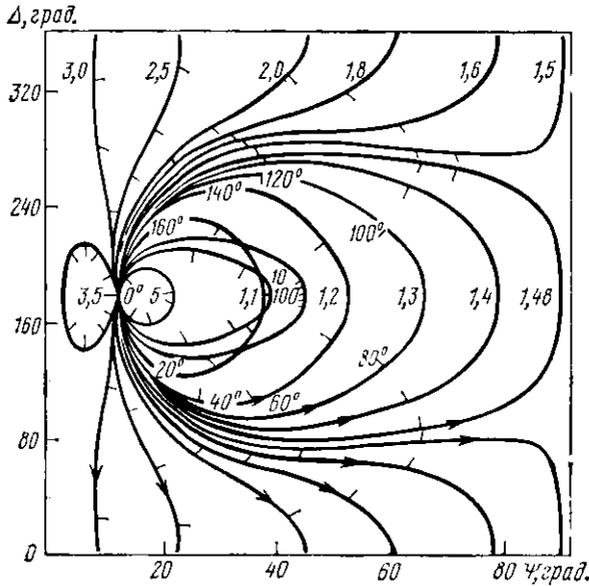


Рис. 5.15. Зависимость Ψ и Δ от показателя преломления и толщины прозрачных пленок на кремнии

та после прохождения компенсатора, чтобы свет, отраженный от исследуемой пленки, стал линейно-поляризованным. Это значит, что суммарный сдвиг фазы в результате действия компенсатора и отражения от пленки и подложки должен быть 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 .

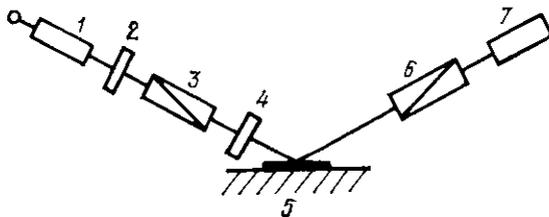


Рис. 5.16. Схема эллипсометра:

1 — источник света; 2, 4 — четвертьволновая пластина (компенсатор); 3 — поляризатор; 5 — подложка; 6 — анализатор; 7 — фотоприемник

5.5.4. Цветовой метод определения толщины пленок SiO₂. Для определения толщины пленок SiO₂ используется известное свойство тонких прозрачных пленок, нанесенных на отражающую подложку: пленка изменяет свой цвет в зависимости от толщины. Метод получил название цветовой. В основе цветового метода лежит явление интерференции световых лучей, отраженных от границы раздела пленка — воздух и пленка — подложка. Оптическая разность хода этих лучей равна $2nd/\cos\theta$, где d — 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 $2d = k\lambda/n$ и $2d = (2k-1)\lambda/2n$ (k — целое число).

При освещении пластины кремния с поверхностной пленкой SiO₂ равномерным нормально падающим белым светом цвет пленки создается той частью спектра излучения, которая не ослабляется при интерференции. При изменении d эта часть спектра изменяется, что влечет за собой изменение цвета. Естественно, что при косом освещении цвет пленки будет изменяться и зависеть от

Таблица 5.3. Зависимость цвета термически выращенной пленки двуокиси кремния от ее толщины

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

угла преломления θ . Таблица 5.3 показывает изменение цвета термически выращенных пленок SiO_2 при возрастании их толщины.

Цветовой метод может быть отнесен к неразрушающим методам контроля толщины, если толщина пленки приблизительно известна (с точностью примерно $\pm 0,075$ — $0,1$ 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 собой всю серию цветовых полос — от соответствующей максимальной толщины до цвета неокисленного кремния — что позволяет установить порядок интерференции.

Глава 6

Фотолитография

§ 6.1. Введение

Получение рельефа требуемой конфигурации в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковых или диэлектрических подложек, является неотъемлемым процессом технологии изготовления ИС. Он получил название литографии. Литография основана на использовании особых высокомолекулярных соединений — резистов, обладающих способностью изменять свои свойства под действием различного рода излучений — ультрафиолетового (фотолитография), рентгеновского (рентгенолучевая литография), потока электронов (электронолитография).

Наиболее широкое распространение в производстве ИС получила фотолитография. Фотолитография состоит в следующем. Чувствительные к свету соединения (*фоторезисты*) наносятся на поверхность подложки и подвергаются воздействию излучения (*экспонируются*). 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. Что касается других видов литографии, то они будут рассмотрены в заключительной главе технологической части (см. гл. 9).

§ 6.2. 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. 6.1, а), пленка негативного фоторезиста, наоборот, под действием излучения становится нерастворимой, в то время как неосвещенные участки при проявлении растворяются (рис. 6.1, б).

Свойства фоторезистов характеризуются следующими параметрами.

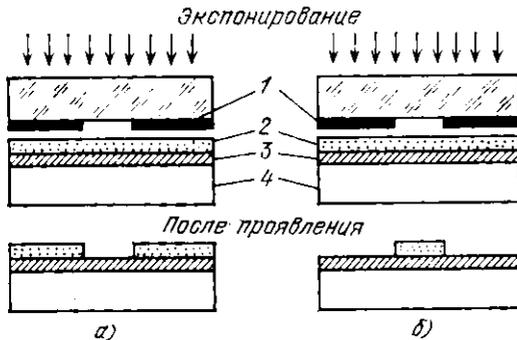


Рис. 6.1.

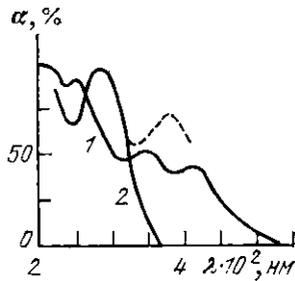


Рис. 6.2.

Рис. 6.1. Получение рисунка для позитивного (а) и негативного (б) фоторезистов:

1 — фотошаблон; 2 — пленка фоторезиста; 3 — пленка; 4 — подложка

Рис. 6.2. Спектры поглощения фоторезистов:

1 — позитивный; 2 — негативный

6.2.1. Чувствительность к излучению. Широкое распространение получили фоторезисты, чувствительные к ультрафиолетовому излучению. Это негативные фоторезисты на основе поливинилпирролидона, 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. 6.2. Для позитивного фоторезиста спектральная характеристика содержит несколько максимумов поглощения, длинноволновая граница поглощения соответствует 460—480 нм. Для негативного резиста длинноволновая граница 310 нм. Введением специальных веществ — сенситизаторов — она сдвигается до 400—420 нм (штриховая линия).

Критерием чувствительности является получение локальных участков с высокими защитными свойствами. 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. 6.3). Как показали исследования, наилучшее качество рисунка, в частности четкость края, достигается, если h_s близка к полной толщине слоя фоторезиста. Критерием чувствительности позитивного фоторезиста является полное удаление пленки фоторезиста в экспонированных участках. Полное удаление происходит в том случае, если достигается максимальная скорость проявления. Зависимость скорости проявления от экспозиции (рис. 6.4) является *характеристической кривой* для позитивного фоторезиста.

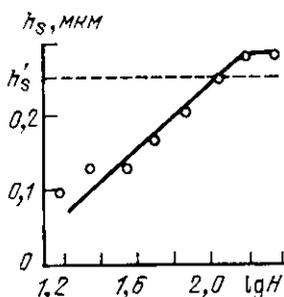


Рис. 6.3.

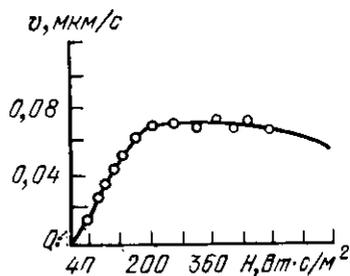


Рис. 6.4.

Рис. 6.3. Характеристическая кривая негативного фоторезиста

Рис. 6.4. Характеристическая кривая позитивного фоторезиста

6.2.2. Разрешающая способность. Разрешающая способность слоя фоторезиста определяется как число задублинных линий на 1 мм, разделенных свободными от резиста промежутками. Разрешающая способность слоя зависит от его толщины и составляет для используемых в настоящее время фоторезистов 2000 лин./мм при толщине 0,2—0,3 мкм.

Разрешающая способность, характеризующая слой фоторезиста, обычно не достигается при создании рисунка в пленке SiO_2 . Это обусловлено рядом факторов, влияющих на процесс фотолитографии, таких как параметры источника излучения, метод получения пленки SiO_2 и обработка ее поверхности, выбор травителя и др. В связи с этим вводится еще одно понятие разрешающей способности, характеризующей для данного фоторезиста фотолитографический процесс в целом. Разрешающая способность процесса определяется как число линий, вытравленных в пленке SiO_2 (толщиной 0,5—1 мкм) на 1 мм и чередующихся с линиями окис-

ла такой же ширины. Эта разрешающая способность достигает 400 лин./мм.

6.2.3. Кислотостойкость. Этот параметр определяет стойкость фоторезистов к воздействию агрессивных травителей. Нестойкость проявляется в растравливании пленки SiO_2 на границах рельефа, в результате чего возникает «клин» — растравленная область с переменной толщиной SiO_2 . Кислотостойкость принято характеризовать отношением толщины пленки SiO_2 h к ширине растравленной области x , которое называют обычно клином травления (рис. 6.5).

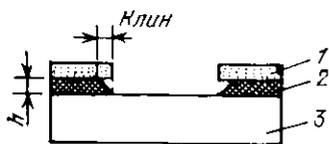


Рис. 6.5. Подтравливание на границе рельефа окисной пленки:

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

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 промышленности нашли позитивные фоторезисты марок ФП-383, ФП-307, ФП-330, РН-11, РН-11А. Поэтому в дальнейшем технологический процесс фотолитографии будет рассмотрен для позитивных фоторезистов.

§ 6.3. Технология фотолитографического процесса

Технологический процесс фотолитографии проводится в следующей последовательности: обработка подложки; нанесение фоторезиста; сушка фоторезиста; совмещение и экспонирование; проявление защитного рельефа; сушка фоторезиста (задублирование); травление подложки; удаление фоторезиста.

6.3.1. Обработка поверхности подложек. Защитный рельеф фоторезиста получают на самых разнообразных пленках. Так, только в планарной технологии фоторезист наносится на пленки четырех типов материалов, получаемых на кремниевых подложках, — двуокись кремния, боросиликатное стекло, фосфоросиликатное стекло, алюминий. В технологии тонкопленочных микросхем разнообразие материалов еще более 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. Гидрофильность поверхности можно характеризовать углом смачивания*¹ поверхности пленки водой.

В пленках SiO_2 , полученных в парах воды или во влажном кислороде, вода может образовывать с поверхностными атомами окисла 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 1 ч, то дополнительная термообработка в сухом кислороде или азоте при $T = 1000^\circ\text{C}$ в течение нескольких минут позволяет устранив 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 органических растворах.

Для стабилизации адгезионных свойств фоторезиста к поверхности пленок алюминия разрабатывают новые методы их получения, позволяющие повысить чистоту поверхности. Например, при вакуумном испарении улучшить адгезию можно заменой резистивных испарителей электронно-лучевым нагревом. При этом качество рисунка повышается благодаря увеличению скорости травления алюминия. Увеличение скорости травления наблюдается для пленок, полученных при более высоких скоростях напыления, характерных для электронно-лучевого нагрева.

6.3.2. Нанесение и сушка фоторезиста. Для нанесения фоторезиста на подложку можно использовать: центрифугирование, пульверизацию, окувание в раствор, полив.

В настоящее время наиболее распространенным способом является нанесение фоторезиста с помощью центрифуги. Подложка помещается на вращающийся диск, на центральную часть подложки наносится фоторезист. Равномерность нанесения фоторезиста в этом случае обеспечивается центробежными силами благодаря быстрому вращению центрифуги. Скорость вращения составляет сотни и тысячи оборотов в минуту в зависимости от требуемых толщины и вязкости слоя резиста.

Толщина слоя фоторезиста выбирается на основании допустимой в ней плотности *проколов***² и заданных размеров элементов. При этом можно исходить из того, что минимальный размер элемента a_{\min} и толщина слоя фоторезиста h в определенном приближении связаны соотношением $h \leq 0,3a_{\min}$. Это соотношение накладывает ограничение на максимально допустимую толщину слоя. Минимально допустимая толщина определяется допустимой плотностью проколов, поскольку с уменьшением h плотность дефектов возрастает. Время нанесения фоторезиста 20—40 с при скорости вращения центрифуги 4000—2000 об/мин.

*¹ Углом смачивания называют угол, образованный поверхностью пленки и касательной к поверхности капли воды.

**² Под проколом понимается сквозное отверстие в слое фоторезиста.

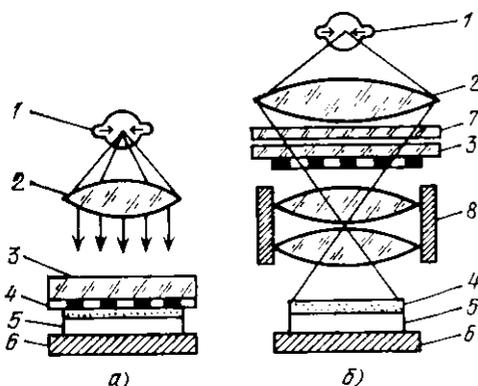
Особенностью других методов нанесения фоторезиста является возможность получения только толстых слоев фоторезиста (приблизительно от 2,5 до 20 мкм).

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

6.3.3. Операции совмещения, экспонирования и проявления.

Операции совмещения и экспонирования выполняются на специальных установках, конструкции которых определяются способом передачи изображения. В настоящее время нашли практическое применение два способа передачи изображений: *контактное экспонирование* и *проекционное экспонирование*.

Схема контактного экспонирования представлена на рис. 6.6, а. Источник света подбирается по спектральной характеристике и мощности. Достаточно высокую интенсивность излучения в диапазоне 360—450 нм и мощность 100—500 Вт обеспечивают ртутно-кварцевые лампы высокого давления ДРШ-100, ДРШ-250, ДРШ-500. Для создания равномерного светового потока с параллельным пучком света используются системы кварцевых конденсоров. Время экспонирования задается специальным устройством — электромагнитным затвором.



Для создания равномерного светового потока с параллельным пучком света используются системы кварцевых конденсоров. Время экспонирования задается специальным устройством — электромагнитным затвором.

Рис. 6.6. Схемы контактного (а) и проекционного (б) экспонирования:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3 — фотошаблон; 4 — фоторезист; 5 — пластина кремния; 6 — столик; 7 — светофильтр; 8 — проекционный объектив

Установка содержит устройство совмещения, с помощью которого осуществляются взаимная ориентация 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 с достаточно высокими разрешающей способностью и глубиной резкости, поскольку эти параметры определяют минимальный видимый размер элемента и обеспечивают четкое изображение как на фотошаблоне, так и на подложке при наличии рабочего зазора между ними при совмещении. Для совмещения элементов с размерами 2—5 мкм необходимо увеличение в 200 раз. Если при этом требуется глубина резкости 10—15 мкм, то рабочее поле составляет около 1—3 мм. 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 удаленных 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. п.

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 Френкеля, 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. При серийном производстве контактная фотолитография обеспечивает 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, устраняются. Схема проекционного экспонирования представлена на рис. 6.6.б. На подложку, покрытую слоем фоторезиста, с помощью системы объективов проецируется изображение получаемого рисунка. При этом размеры рисунка на фотошаблоне могут превышать заданные, и проецирование 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 усиливаются требования к плоскостности подложек и к однородности толщины слоя фоторезиста.

Трудности в повышении разрешающей способности вызваны явлением интерференции при экспонировании в монохроматическом свете. Многократные отражения на границах раздела фоторезист — подложка и фоторезист — воздух приводят к появлению составляющей светового излучения, распространяющейся в боковые стороны. Минимальный размер в слое фоторезиста, получаемый 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 времен экспонирования и проявления и исходить из того, 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 КОН и NaOH или тринатрийфосфата Na_3PO_4 . После проявления производят вторую сушку резиста (задубливание).

Цель этой операции состоит в повышении адгезии и кислотостойкости. Сушка проводится при температурах 130—200°C для резистов различных марок, как правило, в несколько этапов с постепенным повышением температуры. На этом завершается создание защитного рельефа фоторезиста.

6.3.4. Создание рельефа в диэлектрических и металлических пленках. В данном случае рельеф создается локальным травлением свободных от фоторезиста участков. Выбор травителей определяется материалом обрабатываемых пленок.

Для травления двуокиси кремния, боросиликатных и фосфоросиликатных стекол применяют буферные травители, содержащие плавиковую кислоту и 40 %-ный водный раствор фтористого аммония NH_4F в соотношении 1:2. Использование чистой плавиковой кислоты для травления этих пленок не дает качественных результатов, поскольку при травлении выделяется газ. Его выделение связано с реакцией SiO_2 с HF , в результате которой возможно образование не только H_2SiF_6 , но и газообразного SiF_4 . Добавление в травитель фторида NH_4F создает определенную концентрацию ионов фтора, при этом газообразный SiF_4 связывается в комплексе SiF_6^{2-} .

Для травления алюминия могут использоваться водные растворы KOH , ортофосфорной кислоты H_3PO_4 , смесь HF с водным раствором CrO .

Фоторезист удаляют кипячением в серной кислоте, обработкой в горячей (70—80°C) смеси диметилформамида и моноэтаноламина.

§ 6.4. 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 прибора или элемента ИС, многократно повторенных в пределах поля пластины. Обычно используют металlostеклянные фотошаблоны, в которых рисунок получается тонкой металлической пленкой, нанесенной на стеклянную подложку. Для изготовления фотошаблонов применяют в основном два метода. Первый метод основан на сочетании оптических (фотографических) и прецизионных механических процессов и получил название оптико-механического. Суть метода состоит в механическом вырезании первичного оригинала — увеличенного в 200—500 раз рисунка, в последовательном фотографическом уменьшении размеров рисунка и его мультипликации. Второй метод генерации изображений, или метод фотонабора, основан на разделении топологической структуры фотошаблона на элементарные прямоугольники различной величины и последовательной фотопечати этих прямоугольных элементов на фотопластину.

6.4.1. Оптико-механический метод. Оригиналы вычерчиваются на специальных приборах — координатографах. Для изготовления оригиналов используются стеклянные или пленочные подложки, покрытые тонкой непрозрачной и легкоудаляемой пленкой. К подложкам и пленкам предъявляются следующие требования. Подложки должны обладать достаточной стабильностью при изменении температуры и влажности. Непрозрачная пленка должна иметь определенный спектр пропускания, а именно быть прозрачной для красного света и задерживать коротковолновую часть видимого света, к которой чувствительны фотоэмульсии; обеспечивать вырезание резцом контуров с ровным краем (неровность не должна превышать 10 мкм); обеспечивать быстрое и чистое снятие с подложки вырезанных областей с сохранением хорошего сцепления и прочности неснятых участков; обладать минимальным электрическим зарядом для легкого удаления вырезанных областей и снижения способности притягивать пылинки наэлектризованной поверхностью. Для подложек используются стеклянные пластины или полиэфирные пленки размером до 1200×1200 мм, для покрытий — нитроэмали и лаки.

Координатограф представляет собой плоский стол, над которым может передвигаться резцовая головка с режущим инструментом. Управление перемещением резца может быть либо ручным, либо автоматическим. В последнем случае управление перемещением и само перемещение режущего инструмента осуществляются автоматически по заданной программе, вводимой в ЭВМ.

Затем изготавливается *промежуточный фотошаблон* с рисунком оригинала после его фотографического уменьшения. Для изготовления промежуточного фотошаблона используются специальные фотопластины, к которым предъявляются следующие требования: разрешающая способность фотослоя должна быть не менее 1500—2000 лин./мм; величина размытости края при переходе от черного к белому — не более 0,1—0,2 мкм.

Процесс мультипликации заключается в уменьшении изображения структуры на промежуточном фотошаблоне до окончательного размера и многократном повторении этого изображения. Для его проведения используются прецизионные *шагово-повторные фотокамеры (фотоповторители)*. Фотоповторитель представляет собой камеру проекционной фотопечати уменьшенных изображений на фотопластину. Фотопластина механически перемещается в плоскости изображений, и периодически на нее экспонируется рисунок структуры.

Обычно создается *комплект фотошаблонов*, включающий столько фотошаблонов, сколько операций фотолитографии необходимо провести для изготовления ИС. Для повышения степени совмещаемости фотошаблонов в комплекте применяются *многопозиционные повторители*, состоящие из нескольких проекционных систем, в которые одновременно устанавливается весь набор промежуточных фотошаблонов, входящих в комплект. Поскольку при этом

шаговая погрешность одинакова для всех фотошаблонов, несовместимость рисунков практически исключается.

Слабая механическая стойкость эмульсионных фотошаблонов приводит к появлению значительного числа дефектов после 10—15-кратного использования. Поэтому в настоящее время в качестве рабочих фотошаблонов используются *металлизированные фотошаблоны* на основе пленок хрома и *полупрозрачные фотошаблоны* на основе кремния, окислов железа и ванадия. Фотошаблоны на основе полупрозрачных пленок (транспарентные) обладают селективным светопропусканием, достаточно хорошо пропускают видимый свет (от 50 до 70 %) и практически не пропускают света с длинами волн менее 490 нм.

6.4.2. Метод фотонабора. При создании БИС топологический рисунок каждого слоя схемы (каждого стекла комплекта фотошаблонов) существенно усложняется. Если для простых ИС 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 на координатографе. Поэтому весьма заманчиво исключение этой операции из общего технологического цикла создания комплекта фотошаблонов.

Применение фотонабора позволяет процессы вырезания оригинала и последующего его отъема для получения промежуточного фотошаблона заменить одним процессом. Для этого весь топологический рисунок делится на прямоугольники различной площади и с различным отношением сторон в зависимости от формы и размеров составляющих его элементов. Эти прямоугольники последовательной фотопечатью наносятся на фотопластину, на которой образуется промежуточный фотошаблон с 10-кратным увеличением рисунка по сравнению с его окончательным размером. Для проведения фотопечати разработаны специальные микрофотонаборные установки (рис. 6.7). Основным узлом установки является наборная диафрагма, состоящая из четырех пластин. Перемещением этих пластин (обычно подвижны две из четырех), формируется прямоугольное окно с заданными размерами сторон. Перемещение пластин осуществляется не плавно, а дискретно. Дискретность перемещения составляет в различных установках от 10 до 100 мкм (при расчете на окончательный размер рисунка фотошаблона — от 1 до 10 мкм). Электродвигателем может осуществляться поворот всей диафрагмы. Пределы поворота составляют $\pm 45^\circ$.

Наборная диафрагма помещается в предметной плоскости оптической системы (проектора) с высоким разрешением и освещается светом от осветителя с ртутно-кварцевой лампой ДРШ-250, прошедшим через конденсорную систему линз.

Световой лучок, проходя снизу вверх через прямоугольную диафрагму, 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. Поэтому первой стадией работы по изготовлению фотошаблонов является составление программы фотонабора. При составлении программы целесообразно также использовать ЭВМ. При этом на перфорируемую ленту записываются координатные точки топологического рисунка слоя. Обработывая введенные данные, ЭВМ разлагает топологический рисунок на элементарные прямоугольники, оптимизируя это разложение по минимальному числу экспозиций.

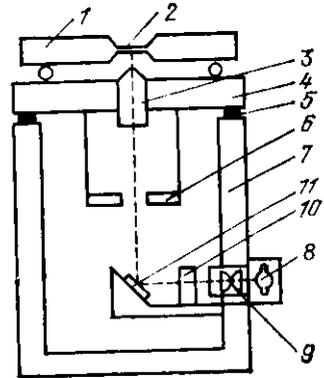


Рис. 6.7. Схема микрофотонаборной установки:
1 — координатный стол; 2 — фотопластина; 3 — проектор;
4 — основание; 5 — резиновые прокладки; 6 — наборная диафрагма; 7 — тумба; 8 — осветитель; 9 — конденсор;
10 — затвор; 11 — зеркало

Последовательность операций при изготовлении промежуточного фотошаблона на микрофотонаборной установке состоит в следующем. В соответствии с полученной программой фотонабора с помощью ЭВМ происходят управление координатным столом и установление его в такое положение, в котором центр экспонируемого прямоугольника совпадает с оптической осью проектора. При этом автоматически устанавливается и размер экспонируемого прямоугольника благодаря управлению от ЭВМ подвижными пластинами наборной диафрагмы. На время экспонирования координатный стол останавливается, затем он вновь перемещается на следующую позицию и устанавливается соответствующий этой позиции размер экспонируемого прямоугольника.

Технические характеристики современных микрофотонаборных установок следующие: размер фотопластины 70×70 мм, дискретность перемещения 2,5 мкм, точность позиционирования $\pm 1,5$ мкм, производительность 900 эксп./ч.

Глава 7

Технологический процесс изготовления полупроводниковых интегральных микросхем

§ 7.1. Введение

Полупроводниковые интегральные микросхемы делятся на биполярные и МДП ИС, отличающиеся типом основного элемента, а также способами электрической изоляции элементов в схеме. Это

приводит к различию в конструировании этих схем и их функциональной сложности, а также обуславливает различие их электрических характеристик.

С точки зрения технологии изготовления биполярные и МДП ИС очень близки, хотя есть и некоторые особенности: например, необходимость специальных процессов для изоляции элементов в биполярных схемах и процессов получения тонких пленок подзатворного диэлектрика в МДП-схемах.

Технологический процесс производства полупроводниковых ИС многооперационный и длительный. Он включает такие разнородные физические, химические и металлургические процессы, как диффузия, химическая обработка, фотолитография, нанесение и вжигание тонких пленок и др. Общее число технологических операций превышает 500, а при изготовлении БИС 800, длительность технологического цикла — до 50 дней.

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

§ 7.2. Методы изоляции элементов

Основной тенденцией развития ИС 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 уменьшить размеры изолирующих областей и электрическую связь между элементами. При создании полупроводниковых ИС малой и средней степеней интеграции широко используются методы изоляции обратносмещенным $p-n$ -переходом и пленкой двуокиси кремния (эпик-процесс). Для БИС разработана изопланарная технология изоляции с одновременным использованием и обратносмещенного $p-n$ -перехода, и диэлектрических пленок.

7.2.1. Изоляция $p-n$ -переходом и диэлектрическими пленками. На рис. 7.1 представлена структура транзистора — элемента ИС, изолированного $p-n$ -переходом. В основе лежит пластина кремния p -типа ($\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) с эпитаксиальным n -слоем ($\rho = 0,1 - 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, толщина 5—15 мкм) и скрытым n^+ -слоем (удельное сопротивление слоя 10—75 Ом/□, толщина 7—8 мкм). Изолирующий $p-n$ -переход создается диффузией акцепторной примеси на глубину, обеспечивающую соединение диффузионной p -области с p -подложкой. Таким образом, происходит разделение эпитаксиального n -слоя на отдельные, изолированные друг от друга n -области. Очевидно, что плотность элементов ИС зависит от размеров разделительных диффузионных p -областей. Размер этих областей, т. е. расстояние между двумя изолирующими $p-n$ -переходами, определяется размером открытого окна в маскирующей пленке SiO_2 и глубиной боковой диффузии, примерно равной толщине эпитакси-

ального слоя. В простых ИС это расстояние составляет 35—40 мкм (при толщине слоя ~ 10 мкм и ширине окна 10 мкм).

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) не только позволило повысить плотность элементов при изоляции p - n -переходом, но и привело к созданию новых методов изоляции.

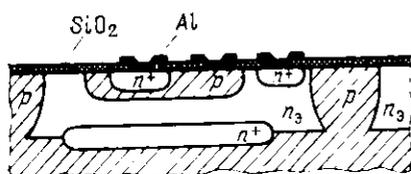


Рис. 7.1. Структура транзистора, изолированного p - n -переходом

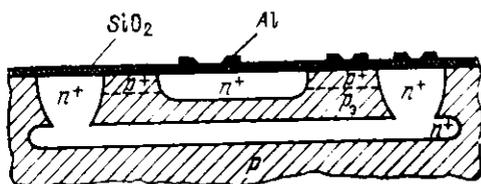


Рис. 7.2. Структура транзистора с коллекторной изолирующей диффузией

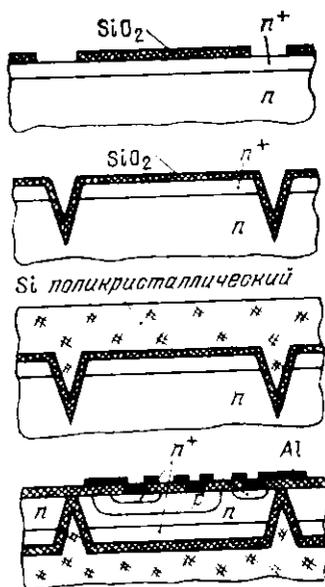


Рис. 7.3. Схема эпитаксиального процесса

Одним из них является изоляция коллекторной диффузией — метод ИКД (рис. 7.2). Здесь исходной является пластина кремния p -типа с эпитаксиальным слоем p -типа и скрытым слоем n^+ -типа. Изоляция осуществляется диффузией донорной примеси и созданием сильно легированных n^+ -областей, смыкающихся со скрытым n^+ -слоем. Объединенная таким образом n^+ -область является коллектором транзистора. Эпитаксиальный p -слой является базой. Долегирование акцепторной примесью этого слоя позволяет исключить большой разброс его сопротивления, обусловленный проникновением примеси из скрытого слоя. Особенности ИС 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. 7.3 показаны структуры, иллюстрирующие последовательность операций технологического процесса изоляции элементов тонкими диэлектрическими пленками (эпик-процесс). На исходной пластине n -кремния выращивается эпитаксиальный n^+ -слой. На поверхности пластины локальным анизотропным травлением на глубину 20—30 мкм создается рельеф. Рельефная поверхность термически окисляется, получается изолирующая пленка двуокиси кремния толщиной около 1 мкм. На поверхность SiO_2 наносится слой поликристаллического кремния. При этом используются методы, разработанные для эпитаксиаль-

ного наращивания кремния. Толщина поликристаллического слоя составляет 200—250 мкм. Исходный монокристалл кремния сошлифовывается до тех пор, пока вскрыется дно вытравленных канавок. Таким образом, в поликристаллическом кремнии образуются изолированные друг от друга слоем SiO_2 монокристаллические области. В дальнейшем в этих областях создаются элементы ИС.

Существенным недостатком этого метода изоляции является необходимость прецизионной шлифовки. Иногда на слой SiO_2 наносится пленка нитрида кремния; его высокая твердость способствует точности контроля процесса шлифовки, поскольку скорость шлифовки резко снижается, как только вскрывается пленка нитрида кремния. После высокотемпературных обработок (окисление, выращивание поликристалла) у пластины кремния наблюдается прогиб. Он приводит к тому, что после шлифовки отдельные области исходного монокристалла имеют значительный разброс по толщине.

Сравнительная оценка методов изоляции $p-n$ -переходом и тонкой диэлектрической пленкой дана в табл. 7.1. Диэлектрическая изоляция позволяет на несколько порядков снизить токи утечки изоляции и на порядок — удельные емкости по сравнению с изоляцией $p-n$ -переходом. Однако отмеченные технологические недостатки эпоксид-процесса заставляют вести поиск новых методов, в частности комбинирующих изоляцию диэлектриком и $p-n$ -переходом.

Таблица 7.1. Сравнительная оценка методов изоляции $p-n$ -переходом и тонкой диэлектрической пленкой

Элемент ИС	Изолированная площадь, мкм^2	Ток утечек при $T=125^\circ\text{C}$, мкА		Емкость, пФ	
		$p-n$ -переход	SiO_2	$p-n$ -переход	SiO_2
Резистор:					
0,1 кОм	$1,5 \cdot 10^4$	15	$1,5 \cdot 10^{-3}$	4,5	0,45
1 кОм	$4 \cdot 10^4$	40	$4 \cdot 10^{-3}$	12,0	1,2
10 кОм	$2 \cdot 10^5$	200	$20 \cdot 10^{-3}$	60,0	6,0
Транзистор	10	10	10^{-3}	3,0	0,3

7.2.2. Изопланар. Совместное использование диэлектрических слоев и $p-n$ -переходов для изоляции элементов ИС характерно для изопланарной технологии.

На рис. 7.4 представлены структуры транзистора на различных этапах изопланарной технологии. Исходной является пластина кремния p -типа с эпитаксиальным n -слоем и скрытым n^+ -слоем.

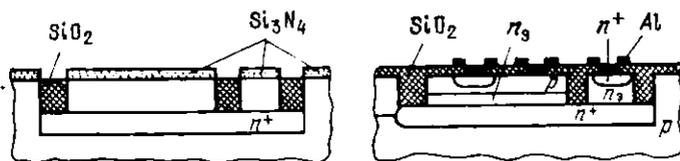


Рис. 7.4. Схема изопланарного процесса

Изоляция создается локальным окислением эпитаксиального слоя по всей его толщине, при этом толщина эпитаксиального слоя не должна превышать 1 мкм. Это ограничение обусловлено тем, что рост толстых слоев SiO_2 при термическом окислении происходит по

параболическому закону и получение слоев SiO_2 толщиной более 1 мкм является очень длительным технологическим процессом. 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 . После создания изолированных областей формируется структура транзистора.

В силу того, что база транзистора может примыкать непосредственно к изолирующей области SiO_2 , общая площадь, занимаемая транзистором, снижается. Эта особенность изопланарной техно-

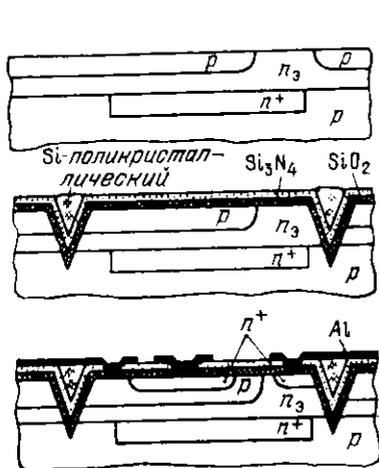


Рис. 7.5. Схема процесса изоляции с V-образными углублениями

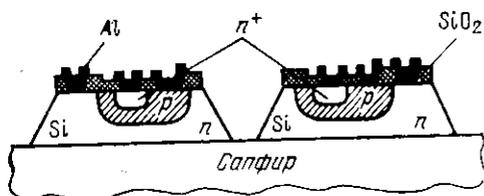


Рис. 7.6. Структура транзисторов на сапфировой подложке

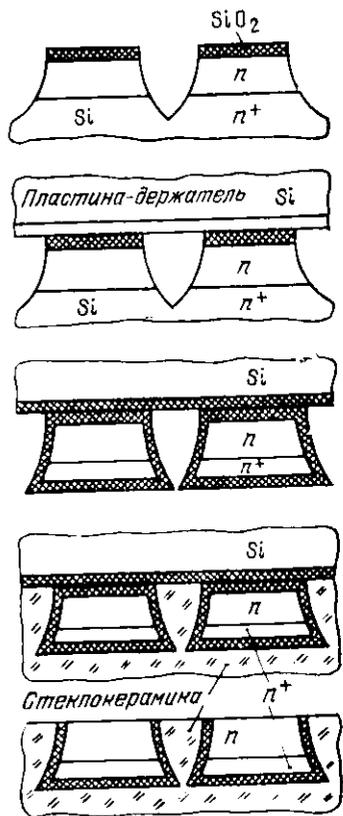


Рис. 7.7. Операции процесса изоляции элементов в ИС на непроводящей подложке перед их изготовлением

логии является исключительно важной при изготовлении БИС, когда задачи повышения плотности компоновки элементов становятся особенно значимыми.

При больших толщинах эпитаксиальных слоев, например до 3 мкм, перед окислением частично вытравливают эпитаксиальный слой, получая анизотропным травлением V-образные углубления (рис. 7.5).

7.2.3. Интегральные микросхемы на непроводящих подложках. Паразитные емкости между отдельными элементами и емкости между элементами и подложкой снижают быстродействие ИС. Эти паразитные емкости можно существенно уменьшить заменой полупроводниковой подложки непроводящей. Разработано несколько методов изготовления ИС на непроводящих подложках.

К одному из них привело развитие технологии гетероэпитаксиального наращивания, в том числе на диэлектрических подложках (например, кремний на сапфире — КНС). Структура элемента с изоляцией по методу КНС представлена на рис. 7.6. Исходной является гетероэпитаксиальная структура, представляющая собой подложку из искусственного сапфира $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ или шпиннели MgOAl_2O_3 с эпитаксиальным слоем кремния толщиной 1—3 мкм. «Островки» создаются локальным подтравливанием кремния до подложки.

В схемах на непроводящих подложках изоляция между отдельными элементами может создаваться толстыми слоями диэлектрического материала, обычно стекла или стеклокерамики, для получения которых используется метод горячего прессования. Изоляция в таких схемах может осуществляться на трех различных стадиях: перед диффузионными процессами формирования элементов; после формирования элементов, перед процессами получения межсоединений; после процессов металлизации. Для каждого из этих трех методов су-

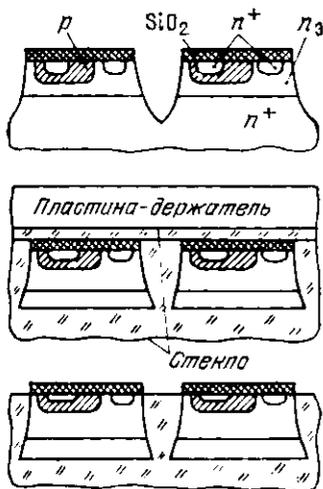


Рис. 7.8.

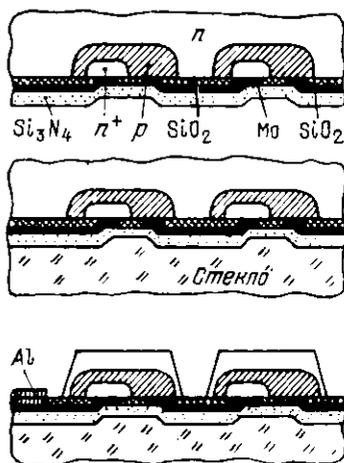


Рис. 7.9.

Рис. 7.8. Операции процесса изоляции элементов в ИС на непроводящей подложке после их изготовления

Рис. 7.9. Операции процесса изоляции элементов в ИС на непроводящей подложке после металлизации (метод «декаль»)

существуют ограничения на выбор диэлектрического материала и температуру процесса создания изоляции. Для первого метода ограничение на температуру связано только с возможным изменением профиля примеси в эпитаксиальном слое. Поэтому процесс может проводиться при $T=1200-1300^\circ\text{C}$. При этом подложка с изоляцией должна выдерживать температуры диффузионных процессов $1100-1200^\circ\text{C}$. Для второго метода температура процесса изоляции не должна превышать $900-950^\circ\text{C}$ с тем, чтобы не изменился профиль примеси в диффузионных слоях. Для третьего, когда структура прибора полностью создана, максимальная температура процесса зависит от типа металла, используемого для межсоединений. Так, для алюминия температура в процессе изоляции не должна превышать 500°C . При использовании вольфрама или молибдена она может быть увеличена до $700-800^\circ\text{C}$. Во всех трех методах к диэлектрическому материалу предъявляются следующие требования: хорошие диэлектрические свойства на высоких частотах (по крайней мере, до единиц гигагерц), совпадение коэффициентов термического расширения диэлектрика и кремния. Последовательность операций технологических процессов изоляции элементов ИС представлена на рис. 7.7—7.9. В первых двух методах приготовление исходной подложки заключается в скреплении двух пластин кремния, из которых одна является рабочей, а вторая — держателем, удаляемым после получения изолирующих областей. Скрепление пластин и заполнение воздушных зазоров диэлектриком осуществляют в установке для горячего прессования. В интегральных микросхемах на непроводящих подложках паразитные емкости и токи утечки изолирующих $p-n$ -переходов практически равны нулю.

§ 7.3. Типовые технологические процессы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем

Типовые (базовые) процессы будут рассмотрены на примере создания двух видов ИС: ИС на основе биполярных транзисторов с изоляцией элементов $p-n$ -переходом и МДП ИС с использованием ионного легирования.

7.3.1. Биполярные интегральные микросхемы. Структура транзистора в биполярных ИС была рассмотрена ранее (см. рис. 7.1). Схема технологического процесса представлена в табл. 7.2. В качестве исходных используются кремниевые пластины с эпитаксиальной структурой $p-n$ -типа и скрытым n^+ -слоем. Параметры таких пластин рассмотрены в табл. 7.3.

Термическое окисление проводится для получения на поверхности кремния пленки SiO_2 толщиной $0,8$ мкм. На основе этой пленки в процессе первой фотолитографии формируется защитная маска для проведения локальной диффузии бора с целью создания изолирующих областей p -типа (*разделительная диффузия*). Окисление проводится в потоке кислорода с изменением его влажности в три этапа: сухой — влажный — сухой.

При разделительной диффузии в качестве источника диффузанта используется BBr_3 . Диффузия проводится в две стадии. Между двумя стадиями с поверхности кремния удаляется пролегированная бором пленка SiO_2 . 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 p -слои с сопротивлением $2-12$ Ом/□.

Таблица 7.2

Схема технологического процесса изготовления биполярной ИС

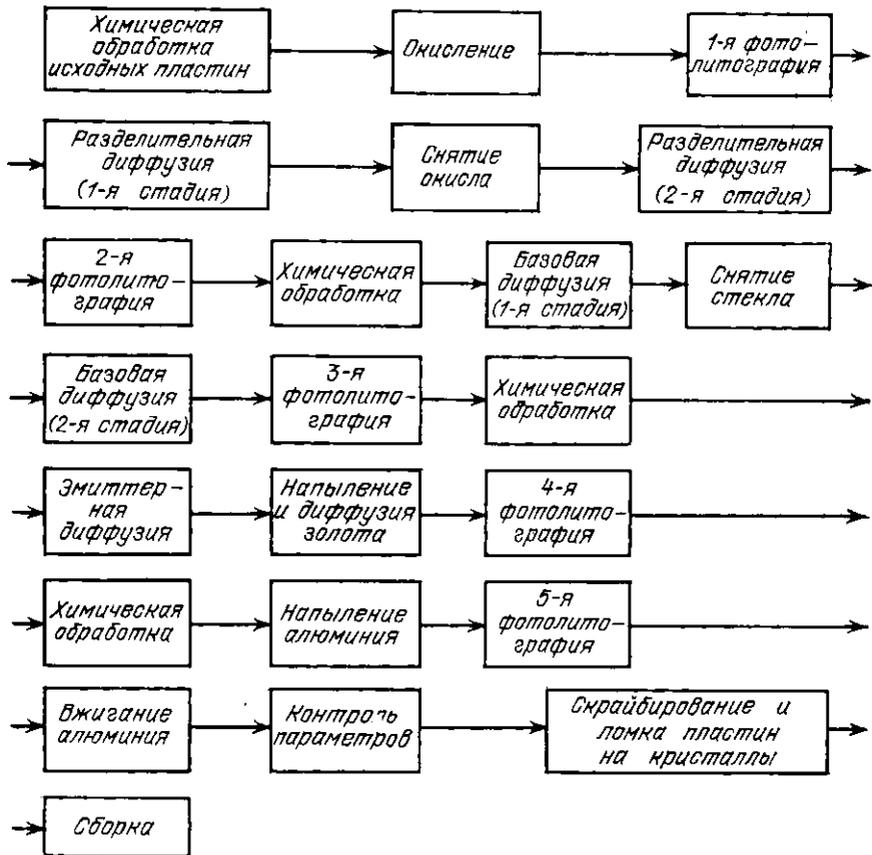


Таблица 7.3. Параметры кремниевых пластин с эпитаксиальными слоями *)

Параметр	Эпитаксиальный n-слой	Скрытый n*-слой**)
Удельное сопротивление, Ом·см	1,5 — 2,5	—
Удельное сопротивление, Ом/□	—	20 — 75
Толщина, мкм	10 — 15	6 — 8

*) В качестве исходных используются пластины кремния КДВ10/0,1 (кремний, выращенный методом Чохральского, дырочной проводимости, легированный бором, с удельным сопротивлением 10 Ом·см и диффузионной длиной неравновесных носителей 0,1 мм).

***) Скрытый слой получен легированием сурьмой.

Для создания транзисторной структуры в качестве источников диффузантов используются WBr_3 и PCl_3 (или $POCl_3$). Диффузионный процесс создания базовой области осуществляется также в две стадии. На первой стадии создается сильно легированный

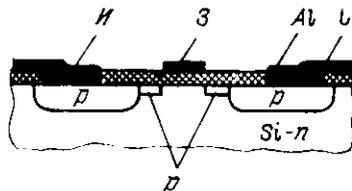
тонкий p^+ -слой с сопротивлением около $90 \text{ Ом}/\square$. После удаления боросиликатного стекла осуществляется вторая стадия диффузии, в процессе которой толщина слоя увеличивается до $1,8\text{—}2,2 \text{ мкм}$, а его удельное сопротивление (в результате перераспределения бора) повышается до $170\text{—}200 \text{ Ом}/\square$. Поскольку вторая стадия диффузии проводится в окислительной среде, на поверхности кремния образуется пленка толщиной около $0,4 \text{ мкм}$. На ее основе осуществляется маска для локальной диффузии при создании эмиттерной области. Толщина диффузионного эмиттерного слоя $1,0\text{—}1,4 \text{ мкм}$, удельное сопротивление слоя $3\text{—}5 \text{ Ом}/\square$.

Для повышения быстродействия микросхемы проводится диффузия золота. В качестве источника используется пленка золота, предварительно нанесенная методом вакуумного испарения. Металлизированная разводка создается напылением алюминия, фотолитографией и вжиганием алюминия в азоте при $T = 550^\circ\text{C}$.

После всех процессов фотолитографии проводится химическая очистка по единой схеме: кипячение в смеси NH_4OH и H_2O_2 (1:1), промывка в деионизованной воде, мойка кистями, сушка на центрифуге.

7.3.2. Интегральные микросхемы МДП. Структура МДП-транзистора, полученная с использованием ионного легирования, представлена на рис. 7.10, а последовательность технологических операций изготовления ИС на его основе дана в табл. 7.4.

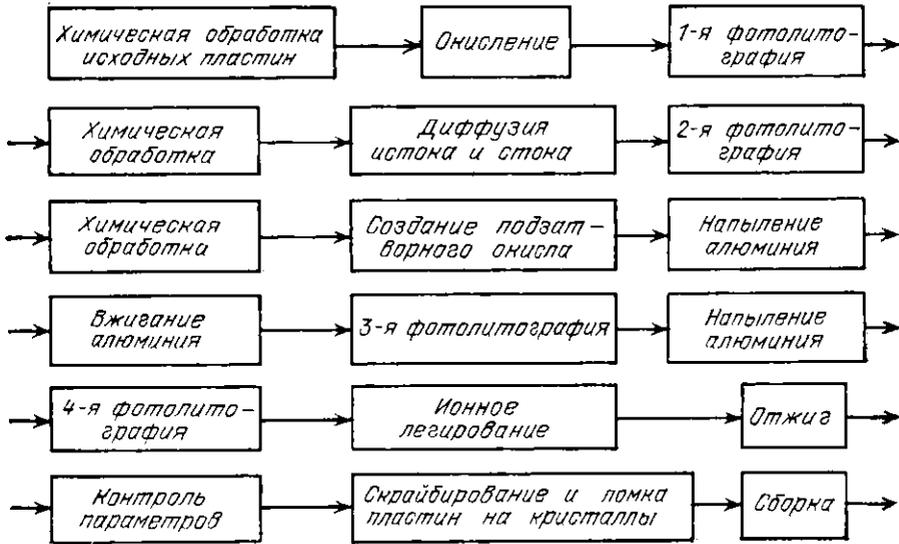
Рис. 7.10. Структура МДП-транзистора, полученная с использованием ионного легирования



Химическая обработка исходных пластин проводится в соответствии с рассмотренным выше (гл. 1) типовым процессом. Методом термического окисления выращивается маскирующая пленка двуоксида кремния толщиной $0,6 \text{ мкм}$. В процессе первой фотолитографии создается маска для получения областей истока и стока локальной диффузией. В качестве источника диффузанта используется VBg_3 .

При второй фотолитографии вскрывается окно в пленке SiO_2 в области затвора. Термическим окислением в этой области создается подзатворный окисел — тонкая ($0,1\text{—}0,15 \text{ мкм}$) пленка SiO_2 . Непосредственно после получения подзатворного окисла на пластину наносится и вжигается пленка алюминия, из которой в процессе третьей фотолитографии формируется затвор. Особенностью его структуры является неполное перекрытие канала. Кроме того, для создания омических контактов к областям истока и стока в процессе третьей фотолитографии проводится вскрытие контактных окон. Повторным напылением алюминия и фотолитографией формируется алюминиевая разводка.

Схема технологического процесса изготовления МДП ИС



Ионным легированием создаются локальные дополнительные области p -типа. Маской при локальном внедрении примеси являются алюминиевая пленка затвора и толстая пленка SiO_2 . При энергии ионов бора до 100 кэВ пленки Al и SiO_2 толщиной соответственно 0,4 и 0,6 мкм защищают от проникновения бора в кремний. При этом тонкая пленка SiO_2 не является маской при внедрении. Для активации внедренного бора и снижения структурных дефектов проводится отжиг пластин при температуре 400°C.

Особенностью МДП-транзистора, получаемого по рассмотренной технологии, является отсутствие перекрытия областей истока и стока под металлизированным затвором, что резко снижает паразитные емкости затвор — исток и затвор — сток.

7.3.3. Сборка полупроводниковых ИС. Процесс сборки полупроводниковых ИС сводится к закреплению кристалла кремния на основании корпуса, присоединению выводов к контактным площадкам на кристалле и внешним выводам корпуса и к герметизации корпуса.

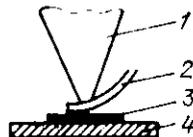
Для полупроводниковых ИС используются в основном четыре типа корпусов: металlostеклянные корпуса круглой формы на 8 и 12 выводов; металlostеклянные плоские прямоугольной формы на 14 выводов; керамические плоские на 24 и 48 выводов; пластмассовые.

Для крепления кремниевых кристаллов на ножку наиболее широкое распространение получил метод пайки эвтектическим сплавом золота с кремнием (температура плавления 370°C). Такой сплав образуется в месте соприкосновения кремния с золотым покрытием ножки 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 полупроводниковых ИС 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 условии соединение металлов может происходить 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 клиновидный керн (рис. 7.11). Сварка происходит при давлении керна на кристалл, расположенный на нагретом основании. Затем проволока присоединяется к внешнему выводу корпуса и отрезается.

Рис. 7.11. Присоединение вывода методом термокомпрессионной сварки клиновидным керном:

1 — керн; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — нагреваемое основание установки для термокомпрессионной сварки



Для создания термокомпрессионных соединений используются следующие режимы: температура кристалла 330—350°С, температура инструмента — до 150°С, давление на инструменте обеспечивается массой приблизительно от 50 до 500 г в зависимости от температуры и диаметра проволоки.

Правильный выбор температуры и давления является основой для получения надежных соединений. Пережим проволоки может привести сразу или при дальнейшей эксплуатации схемы к разрыву проволоки вблизи термокомпрессионного соединения. Еще одной причиной ненадежности термокомпрессионных соединений может служить образование хрупких химических соединений типа $AuAl_2$ и Au_2Al при термокомпрессии золота и алюминия. Такое сочетание материалов широко применяется в полупроводниковых ИС, где контактные площадки выполняются из алюминия, а внешние выводы корпуса покрыты золотом. Герметизация корпусов осуществляется сваркой (или пайкой) основания корпуса с крышкой (баллоном).

Глава 8

Технологические процессы изготовления тонкопленочных и толстопленочных гибридных интегральных микросхем

§ 8.1. Введение

В пленочных интегральных микросхемах элементы создаются осаждением тонких (тонкопленочные ИС) или толстых (толстопленочные ИС) пленок на специальные платы из диэлектрических материалов — подложки. Подложка служит механическим основанием ИС и, будучи диэлектриком, изолирует ее элементы.

На основе напыленных пленок в настоящее время изготавливаются только пассивные элементы (в основном резисторы и конденсаторы). Пленочные схемы, дополненные активными элемен-

тами (диодами, транзисторами, полупроводниковыми ИС) принято называть *гибридными ИС* (ГИС). Активные элементы в этих схемах крепятся на подложке *методом навесного монтажа*.

Такая технология изготовления ИС, при которой пассивные и активные элементы создаются по двум не зависимым друг от друга циклам, приводит к ряду преимуществ, которые обусловили широкое производство и использование ГИС. Гибридные ИС характеризуются простотой изготовления, малой трудоемкостью, непродолжительностью производственного цикла и в силу этого низкой стоимостью.

Многоуровневое расположение пассивных элементов и использование в качестве активных элементов полупроводниковых ИС расширяют возможности схемотехнической разработки при создании БИС.

Технология изготовления тонких и толстых пленок позволяет создавать прецизионные резисторы и конденсаторы, в силу чего гибридная технология предпочтительнее в схемах с повышенной точностью пассивных элементов.

Интегральные микросхемы, работающие в СВЧ диапазоне, также создаются по гибридной технологии. При этом исключаются трудности, связанные с изоляцией элементов толстыми диэлектрическими слоями, неизбежной, если СВЧ ИС выполняется как полупроводниковая.

Толстопленочную технологию целесообразно использовать при разработке мощных ИС, работа которых сопровождается большим выделением тепла.

§ 8.2. Материалы подложек

Размеры подложек выбираются в соответствии со степенью интеграции ИС, их материалы — в соответствии с требованиями, предъявляемыми к электрическим, механическим и термическим свойствам подложек. В свою очередь эти требования обусловлены заданными параметрами пленочных элементов и выбором технологических методов нанесения пленок.

Рассмотрим требования к подложкам. Материал подложек должен иметь высокие объемное и поверхностное удельные сопротивления. Это требование вытекает из необходимости обеспечения электрической развязки между элементами. Кроме того, для большинства материалов с высоким удельным сопротивлением существует определенная взаимосвязь между сопротивлением и их стойкостью к влиянию различных веществ, в том числе из окружающей среды. Низкие диэлектрические потери снижают потери энергии вследствие поглощения в диэлектрике. Высокая теплопроводность 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 облегчает механическую обработку подложек (для получения требуемой формы и размеров и создания в них отверстий), а также предупреждает поломку подложек при сборке микросхем. Подложки должны быть достаточно термостойкими при пайке и сварке; материал подложки и структура поверхности должны обеспечивать хорошую адгезию осаждаемых пленок к подложке.

Перечисленные требования к подложкам являются общими для тонкопленочных и толстопленочных микросхем. Однако в силу значительного различия в свойствах толстых и тонких пленок и методов их нанесения параметры подложек для толсто- и тонкопленочных ИС не совпадают. Это в наибольшей степени относится к адгезии: для тонких и толстых пленок необходимая шероховатость поверхности существенно различается.

В табл. 8.1 приведены характеристики диэлектрических материалов, которые в большей или меньшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к подложкам для тонко- и толстопленочных ИС. Ниже приводится состав рассмотренных материалов.

Таблица 8.1. Характеристики подложек

Материал диэлектрика	Удельное сопротивление, Ом·см	Диэлектрическая постоянная	Диэлектрические потери на частоте 10 ⁶ Гц	Теплопроводность, кал/см·с °С	Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁶ /°С
Боросиликатное стекло	10 ⁷	4,6	6,2·10 ⁻³	0,0027	3,25
Алюмооксидная керамика типа «Поликор»	10 ¹⁴	10,8	2·10 ⁻⁴	0,075 — 0,08	7,5 — 7,8
Алюмооксидная керамика (96% Al ₂ O ₃)	10 ¹⁴	9,1	2,7·10 ⁻³	0,03 — 0,06	6,4
Кварцевое стекло	10 ¹⁶	6,6	3·10 ⁻⁴	0,25 — 0,5	7 — 9
Ситаллы	10 ¹³ —10 ¹⁴	4	3,8·10 ⁻⁴ —2·10 ⁻³	0,0036	0,56—0,6
Лейкосапфир	10 ¹¹	6,5	10 ⁻³ —6·10 ⁻³	0,005—0,009	5
		8,6	2·10 ⁻⁴	0,0055	5

Стекла представляют собой различные системы окислов. Боросиликатное стекло состоит из SiO₂ (80%), B₂O₃ (12%) и других окислов (Na₂O, K₂O, Al₂O₃), алюмосиликатное — из SiO₂ (60%) Al₂O₃ (20%) и других окислов (Na₂O, CaO, MgO, B₂O₃). Стекла типов С-48-3 и С-41-1 являются бесщелочными.

Керамика — поликристаллическое вещество с зернами сложной структуры, получаемое в результате высокотемпературного отжига (спекания) порошков различных окислов. Алюмооксидная керамика типа «Поликор» состоит из Al₂O₃ (99,8%), B₂O₃

(0,1%), MgO (0,1%). Размер зерен — менее 40 мкм. Бериллиевая керамика содержит от 98 до 99,5% окиси бериллия BeO.

Ситаллы — стеклокерамические материалы, получаемые в результате термообработки (кристаллизации) стекла. Большинство ситаллов характеризуется следующим составом окислов: 1) $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$; 2) $\text{RO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2$ (RO — один из окислов CaO, MgO или BaO).

Лейкосапфир — чистый монокристаллический окисел алюминия α -модификации.

Сравнительный анализ этих материалов позволяет сделать следующие выводы.

Стекла имеют недостаточную прочность, низкую теплопроводность, недостаточную химическую стойкость, для них характерно сильное газовыделение при нагреве. Благодаря содержанию окислов щелочных металлов возможно образование ионов этих металлов, обладающих повышенной миграцией при приложении электрического поля и обуславливающих нестабильность свойств стеклянных подложек и элементов микросхем. Повышение химической стойкости и стабильности тонкопленочных ИС обеспечивается подложками из бесщелочных стекол С-41-1 и С-48-3.

Керамика, особенно бериллиевая, имеет значительно большую теплопроводность по сравнению со стеклами. Кроме того, она обладает большей механической прочностью и лучшей химической стойкостью. Однако большие размеры зерен керамических материалов не позволяют получить удовлетворительный микрорельеф поверхности для тонкопленочных ИС. Мелкозернистая керамика с размером зерен в десятые доли микрона широко используется для подложек толстопленочных ИС. При этом наиболее удовлетворительным микрорельефом обладает керамика с 96%-ным содержанием Al_2O_3 . Керамика с более высоким содержанием Al_2O_3 , например типа «Поликор», имеет слишком гладкие поверхности, не обеспечивающие хорошей адгезии к ним толстых пленок. Полировка мелкозернистой керамики снижает микронеровности, однако вызывает существенные и трудно устранимые загрязнения ее поверхности. Поэтому такая операция не позволяет получить подложки, пригодные для тонкопленочных ИС.

Ситаллы в 2—3 раза превосходят стекла по механической прочности. Они хорошо прессуются, вытягиваются, прокатываются. Диэлектрические свойства ситаллов лучше, чем стекол, и они практически не уступают керамике.

Лейкосапфир характеризуется хорошими диэлектрическими свойствами. Однако технология его получения (обычно вытягивание монокристаллов по методу Чохральского) не позволяет получить пластины больших размеров низкой стоимости.

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.

§ 8.3. Материалы пленок в тонкопленочных интегральных микросхемах

Пассивными элементами в тонкопленочных ИС являются резисторы и конденсаторы. Тонкопленочные индуктивные элементы практически не используются ввиду сложности их изготовления.

К материалам, используемым для тонкопленочных резисторов, предъявляются определенные требования по поверхностному сопротивлению. Наибольшее распространение имеют резисторы с сопротивлениями от 10 Ом до 10 МОм. Линейные 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 0,1 мм, а максимальную длину 10 мм, то диапазон необходимых удельных сопротивлений слоя составит $10-10^5$ Ом/□. Получение пленок с удельными сопротивлениями слоя 10^4 Ом/□ и более представляет сложную еще нерешенную задачу.

Помимо требований к значениям удельного сопротивления предъявляются определенные требования и к его стабильности. Кроме того, резистивные пленки должны характеризоваться низким температурным коэффициентом сопротивления ТКС (менее $10^{-4} \cdot 1/^\circ\text{C}$).

Материалы, используемые для тонкопленочных резисторов, можно разделить на три группы: металлы, металлические сплавы, металлodieлектрические смеси — керметы.

Удельное сопротивление массивных металлов не превышает 20—50 мкОм·см даже для таких слабо проводящих 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 вносится дефектами структуры и примесями. Учитывая это, в процессе осаждения некоторых металлических пленок намеренно создаются условия для газопоглощения. Для изготовления металлических резисторов наиболее широко применяют 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 защищать поверхность резистора.

Тонкие пленки полупроводниковых материалов не используются для изготовления резисторов из-за большого отрицательного коэффициента сопротивления.

Помимо металлов для изготовления резисторов широко применяют металлические сплавы, обладающие более высоким удельным сопротивлением даже в массовых образцах: сплав никеля и хрома — нихром с удельным сопротивлением около 100 мкОм·см, а также нихром с добавками других материалов.

Керметы представляют собой металлодиэлектрические смеси. Удельное сопротивление пленок керметов в большой степени зависит от их состава. Поэтому точное воспроизведение состава кермета в пленке играет важную роль. Обычно для напыления применяют метод взрывного испарения (см. § 5.3). Изучено большое число комбинаций металл — диэлектрик: Cr—SiO₂, Al—SiO₂, Pt—Ta₂O₅. Наилучшие результаты получены для комбинации Cr—SiO.

Свойства наиболее распространенных резистивных материалов и резисторов на их основе приведены в табл. 8.2.

Т а б л и ц а 8.2. Параметры материалов, применяемых для создания тонкопленочных резисторов

Материал резистивной пленки	Удельное сопротивление слоя, Ом/□	ТКС · 10 ⁴ , 1/°C
Хром	50 — 500*	+1
Тантал	10 — 300*	—2
Нихром (20 % Cr, 80 % Ni)	300	±1
Железохромоникелевый сплав (71,5 % Fe, 21 % Cr, 7,5 % Ni)	150	+1
Металлосилицидный сплав МЛТ-3М (Fe, Cr, W, Si)	500	±2
Кермет (Cr, SiO)	3000 — 10 000*	—4

* Удельное сопротивление слоя зависит от технологических факторов — скорости напыления, температуры подложки и др.

Тонкопленочный конденсатор имеет трехслойную структуру металл — диэлектрик — металл, расположенную на изолирующей подложке. Основными параметрами диэлектрических материалов для конденсаторов являются удельная емкость $C_{уд} = \epsilon_0 \epsilon / d$, определяемая диэлектрической постоянной $\epsilon_0 \epsilon$ и толщиной слоя диэлектрика d , и электрическая прочность E_d .

Из-за сложности создания бездефектных пленок на большей площади максимальная площадь конденсатора ограничивается. Минимальная площадь ограничивается заданной точностью. Отсюда для обеспечения широкого диапазона емкостей возникают определенные требования к удельным емкостям. Поскольку существует предел и для минимальной толщины пленок (из-за влияния пор и дефектов в пленке диэлектрика на ее электрическую прочность), то при изготовлении тонкопленочных конденсаторов к диэлектрической постоянной материала предъявляются определенные требования. Если ограничить толщину пленки величиной 0,1 мкм, а максимальную и минимальную площади соответственно $2 \cdot 10^2$ и $0,2$ мм², то для обеспечения диапазона емкостей 10 — 10^6 пФ требуются диэлектрические постоянные, примерно равные 0,5—50.

Электрическая прочность диэлектрического материала определяет напряжение пробоя $U_d = E_d d$, а следовательно, и диапазон рабочих напряжений конденсатора. Кроме требований к удельной емкости и электрической прочности диэлектрические материалы должны обладать минимальной гигроскопичностью, высокой механической прочностью при циклических изменениях температуры, хорошей адгезией к подложкам.

Диэлектрические материалы, используемые для тонкопленочных конденсаторов, представляют собой окислы полупроводников и металлов. Из окислов полупроводников наибольшее распространение в технологии тонкопленочных ИС получили монооксид кремния SiO и монооксид германия GeO, имеющие высо-

кие диэлектрические постоянные. Пленки двуоксида кремния SiO_2 значительно реже используются в тонкопленочной технологии, что частично связано с более низкими значениями диэлектрической постоянной, а также с невозможностью использовать для их окисления метод вакуумного термического испарения*).

Среди окислов металлов наибольший интерес представляют оксиды тугоплавких металлов, такие как Ta_2O_5 , TiO_2 , HfO_2 , Nb_2O_5 . Эти материалы по сравнению с другими оксидами обладают наиболее высокими значениями диэлектрической постоянной. Наиболее отработана технология изготовления пленок пентаоксида тантала. Интерес к пленкам тантала и его оксида объясняется возможностью изготовления резисторов и конденсаторов с использованием только этого материала и одних и тех же технологических методов создания, а именно ионно-плазменного распыления и электролитического анодирования.

Свойства материалов, наиболее широко используемых для создания тонкопленочных конденсаторов, представлены в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Параметры материалов, применяемых для изготовления тонкопленочных конденсаторов

Материал диэлектрической пленки	Диэлектрическая постоянная	Тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^8 Гц	Удельная емкость, пФ/см ²	Диэлектрическая прочность, $E \cdot 10^{-6}$ В/см	$\text{ТКЕ} \cdot 10^4$, 1/°С	Материал обкладок; удельное сопротивление слоя, Ом/□
Моноокись кремния	5—6	0,01—0,02	$(0,5—1) \cdot 10^4$	2—3	2	Алюминий; 0,2
Моноокись германия	11—12	0,005	$(0,5—1,5) \cdot 10^4$	1	3	
Пентаокись тантала	23	0,02	$(0,6—2) \cdot 10^5$	2	4	Нижняя — тантал; 1—10. Верхняя — алюминий; 0,2

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 обладать высокой электропроводностью, хорошей адгезией к подложке, способностью к сварке или пайке, химической инертностью.

Материалами с высокой электропроводностью являются золото, серебро, алюминий, медь. Однако пленки этих металлов не удовлетворяют всей перечисленной совокупности свойств. Так, эти металлы, особенно благородные, имеют плохую адгезию к подложке, алюминиевые пленки плохо поддаются пайке и сварке (для присоединения навесных элементов и внешних выводов), медь легко окисляется. Поэтому для получения тонкопленочных проводников используются многослойные композиции. Эти компо-

*) Давление паров SiO_2 при $T = 1600^\circ\text{C}$ приблизительно на пять порядков ниже, чем SiO .

зиции 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. 8.4.

Таблица 8.4. Материалы, применяемые для создания тонкопленочных проводников *)

Материал		Удельное сопротивление слоя, Ом/□
слоя	покрытия	
Золото	—	0,03 — 0,04
Медь	Никель	0,02 — 0,04
Медь	Серебро	0,02 — 0,04
Алюминий	Никель	0,1 — 0,2

*) В качестве подслоя во всех случаях используется хром.

§ 8.4. Получение рисунков в тонких пленках

Рисунки в тонких пленках можно создавать двумя способами: непосредственно в процессе получения пленок с помощью специальных масок (*трафаретов*), накладываемых на подложку, и частичным удалением *) пленки, первоначально нанесенной на всю поверхность подложки.

Рисунок можно получить в процессе осаждения тонких пленок, используя *неконтактные* и *контактные* трафареты.

Неконтактный трафарет представляет 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 способствуют отражение атомов от подложки и осаждение их на внутреннюю, обращенную к подложке, сторону трафарета, а затем повторное их испарение. Эти факторы 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*. Они изготавливаются из фольги бериллиево-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. 8.1 представлена последовательность технологических операций изготовления биметаллического трафарета. Эти трафареты обеспечивают линейные размеры с точностью ± 10 мкм. Износоустойчивость трафарета — не менее 150 напылений.

Контактные трафареты используются для повышения точности. Создание рисунка с помощью таких трафаретов показано на рис. 8.2. На подложку на-

*) Обычно методом фотолитографии.

носятся 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.

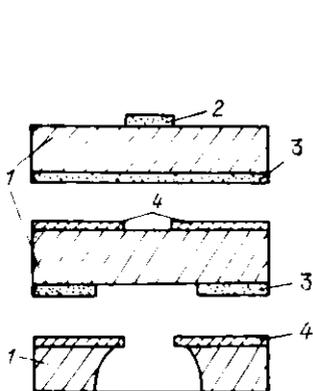


Рис. 8.1.

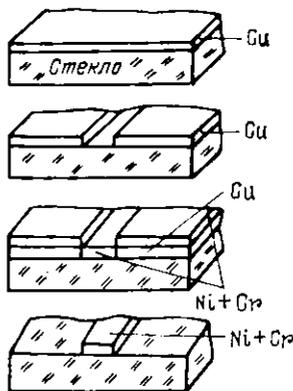


Рис. 8.2.

Рис. 8.1. Последовательность технологических операций изготовления биметаллического трафарета:

1 — медная фольга; 2, 3 — фоторезист; 4 — пленка никеля

Рис. 8.2. Создание рисунка с помощью контактного трафарета

Материалы для контактных трафаретов не должны химически взаимодействовать с материалами тонкопленочной схемы и испаряться при нагревании подложек при получении тонких пленок. Этим требованиям удовлетворяют медь, никель, алюминий, фоторезисты.

Возможность использования фотолитографии для получения рисунка в тонкопленочных ИС определяется в первую очередь такими химическими реактивами, которые способны локально травить пленки, не воздействуя на защитный рельеф фоторезиста. В настоящее время такие травители найдены для достаточно большого числа материалов (табл. 8.5).

§ 8.5. Материалы для толстых пленок и методы их нанесения на подложки

Материалами для пассивных элементов и межсоединений в толстопленочных схемах служат пасты, состоящие из трех компонентов: порошок стекла — *фритта*, *наполнитель* и *связующее вещество*. Элементы ИС создают нанесением этих паст на подложки методом трафаретной печати и последующего их вжигания.

Фритта состоит в основном из стеклообразующих окислов SiO_2 и V_2O_3 , к которым добавляются Al_2O_3 , TiO_2 , PbO . Кроме того, в

Т а б л и ц а 8.5. Химические травители для тонких пленок

Материал пленки	Химические травители
Cr	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)
Au	[HCl+HNO ₃ (1:3)] + [H ₂ O] (1:4)
Ti	1) H ₂ O+HF (1:1); 2) H ₂ O+H ₃ PO ₄ (1:1)
Cr+SiO	H ₃ PO ₄ +HNO ₃ +HF (60:5:1)

состав фритты входят так называемые окислы-плавни Na₂O, K₂O, Li₂O, CaO, MgO, ZnO. Изменением состава плавней можно достаточно широко, примерно от 570 до 1000°C, изменять температуру плавления фритты. Частицы фритты имеют размер до 30 мкм.

Наполнителями служат мелконизмельченные порошки (размер зерна — до 0,3 мкм) металлов (для резистивных и проводящих паст) и диэлектриков (для диэлектрических паст).

В качестве связующих веществ используются углеводородные соединения, например этилцеллюлоза, воск и др. Эти вещества связывают порошкообразные составляющие и обеспечивают вязкость паст до 2000 Пз.

Проводящие пасты должны удовлетворять следующим требованиям: пленки на их основе должны обладать низким удельным сопротивлением слоя (<0,1 Ом/□); они должны обеспечивать возможность присоединения активных элементов методами пайки или сварки. Наполнителями для проводящих паст являются благородные металлы — золото, платина, серебро, палладий и их смеси. Наименьшее удельное сопротивление слоя имеют пасты с золотом и платиной (0,002—0,005 Ом/□). Пасты с другими благородными металлами и их смесями имеют удельное сопротивление слоя от 0,02 до 0,1 Ом/□ в зависимости от толщины пленки и содержания наполнителя. В технологии толстопленочных микросхем иногда проводники, полученные на основе проводящих паст, покрывают свинцово-оловянными припоями, что увеличивает их проводимость примерно на порядок.

Резистивные пасты должны обеспечивать возможность получения на их основе пленок с удельным сопротивлением слоя, изменяющимся от 10 до 10^6 Ом/□. При выполнении этого требования толстопленочные резисторы имеют широкий диапазон номиналов. Наполнителями для резистивных паст, как и для проводящих, являются благородные металлы. При этом сопротивление пленок варьируется изменением процентного содержания наполнителя (рис. 8.3).

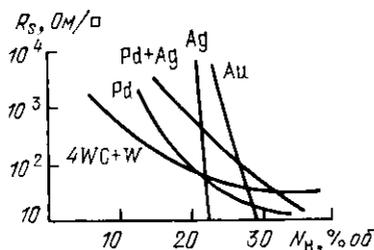


Рис. 8.3.

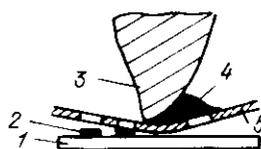


Рис. 8.4.

Рис. 8.3. Зависимость сопротивления пленок от содержания наполнителя

Рис. 8.4. Получение рисунка при трафаретной печати

В пастах, применяемых для получения диэлектрических пленок в конденсаторах, в качестве наполнителей используются диэлектрики с высокой диэлектрической постоянной, например двуокись титана TiO_2 или титанат бария $BaTiO_3$. Удельная емкость конденсаторов на основе этих пленок $4 \cdot 10^4$ пФ/см². Пленки для изоляционной прослойки в местах пересечения проводников создаются на основе фритты без наполнителя, которая имеет малую диэлектрическую постоянную и, следовательно, обеспечивает малую паразитную емкость ($< 0,01$ пФ/см²).

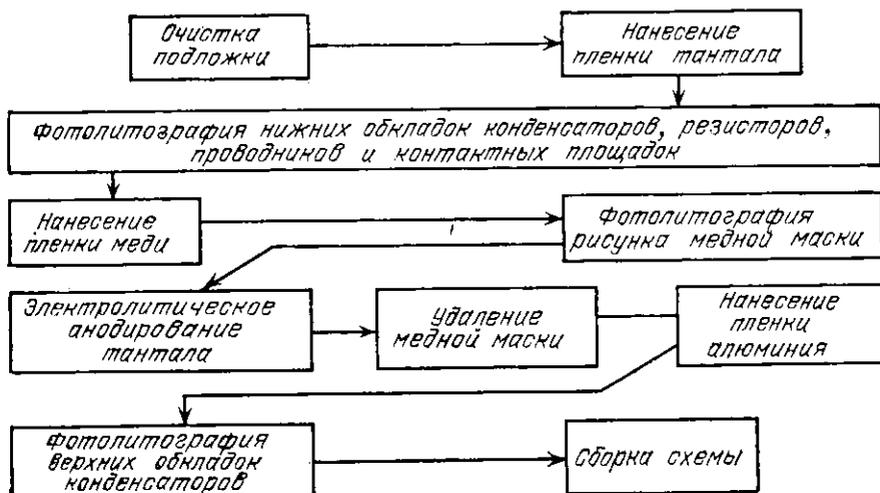
Пасты наносятся на подложки по определенному рисунку через специальные сетчатые трафареты. Метод получил название *трафаретной печати*. Трафарет представляет собой металлическую или капроновую натянутую на рамку сетку с размером ячейки 120 мкм. На сетках создаются рисунки различных слоев микросхемы методом фотолитографии. Маской при этом служит задубленный слой фоторезиста. Паста (4) наносится на сетку (5) и с помощью *ракеля* (3) — инструмента в виде лопаточки из пластичного полимера (например, полиуретана) — продавливается в отверстия сетки на подложку (1); последняя отстоит от трафарета в зависимости от его размера на расстояние $0,25$ — $1,5$ мм (рис. 8.4). Качество нанесения пасты и получаемого рисунка (2) зависит от материала ракеля, скорости его перемещения, угла наклона ракеля к трафарету. Типичными являются скорость перемещения 200 мм/с, угол 45° . Трафаретная печать позволяет получать рисунки с шириной линии 100 мкм и более.

§ 8.6. Типовые технологические процессы изготовления тонкопленочных и толстопленочных интегральных микросхем

8.6.1. Тонкопленочные ИС. Процесс изготовления рассматривается на примере тонкопленочной ИС на основе тантала. В такой ИС конденсаторы имеют структуру $Ta-Ta_2O_5-Al$, а резисторы — $Ta-Ta_2O_5$, проводники и контактные площадки изготавливаются из Ta . Последовательность операций показана в табл. 8.6.

Таблица 8.6

Последовательность операций при изготовлении тонкопленочной ИС



Ситалловые подложки очищаются кипячением в смеси перекиси водорода, аммиака и воды (40 : 1 : 125) с последующей промывкой в дистиллированной воде. Окончательная очистка проводится в паре изопропилового спирта.

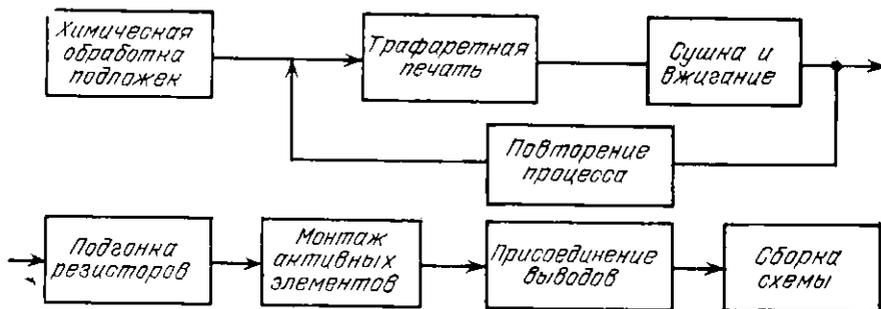
На очищенные подложки методом ионно-плазменного напыления (см. § 5.4) наносится пленка тантала. Методом фотолитографии в пленке тантала создается рисунок нижних обкладок конденсаторов, резисторов, проводников и контактных площадок.

Последующие операции предназначены для получения 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. § 5.3) и создание в пленке меди рисунка маски методом фотолитографии. На не защищенных медью участках электролитическим анодированием пленка тантала частично окисляется, образуя Ta_2O_5 . В качестве электролита могут использоваться 10%-ные растворы лимонной, уксусной или серной кислоты. Элементы рисунка из танталовой пленки, соединенные между собой контактной маской, служат анодом.

По окончании анодирования медная маска удаляется. На подложку наносится сплошной слой алюминия, в котором фотолитографией создается рисунок верхних обкладок конденсаторов.

8.6.2. Толстопленочные ИС. Последовательность технологических операций при изготовлении толстопленочных ИС представлена в табл. 8.7. Создание элементов схемы, т. е. повторяющиеся процессы трафаретной печати, сушки и вжигания паст, проводится в следующей последовательности: нанесение и сушка паст для проводников и нижних обкладок конденсаторов; вжигание проводников; нанесение и сушка паст для диэлектриков в конденсаторах и местах пересечений проводников; нанесение и сушка паст для проводников и верхних обкладок конденсаторов; совместное вжигание паст для диэлектриков и проводников; нанесение, сушка и вжигание резистивных паст.

Таблица 8.7
Последовательность операций при изготовлении толстопленочной ИС



Сушка пасты осуществляется при температуре 80—125°C в течение 15 мин под инфракрасной лампой. При этом из паст удаляется летучая часть связующего органического вещества. Пасты вжигаются в печах конвейерного типа, имеющих 4—6 температурных зон и обеспечивающих постепенное увеличение температуры до максимальной и медленное ее уменьшение до комнатной. Такой режим способствует выгоранию нелетучей части органического связующего, приводит к размягчению фритты, что улучшает адгезию пленок к подложке и параметры элементов. Распределение температуры в печи представлено на рис. 8.5. Для проводящих паст с наполнителем Au+Pt максимальная температура вжигания 900°C, для диэлектрических — 700°C, для резистивных — 650°C.

Большой разброс сопротивлений резисторов, составляющий до $\pm 30\%$ номинального значения, требует введения операции подгонки сопротивления до заданного допуска. Подгонка толстопленочных резисторов состоит в обработке контура резистора лазерным лучом с удельной мощностью излучения 10^6 — 10^8 Вт/см². При этом происходит локальное удаление материала резистора. После под-

гонки на резисторы наносится защитная пленка, для чего можно использовать фритту с температурой вжигания 570°C. Затем следуют сборочные операции.

8.6.3. Сборка гибридных ИС. Процесс сборки ГИС сводится к присоединению активных приборов к тонкопленочным или толстопленочным ИС, к закреплению этих микросхем на основании корпуса и герметизации корпуса.

Для ГИС используются металlostеклянные корпуса квадратной формы с числом выводов 18 и круглой формы с числом выводов 8 и 12, а также корпуса пенального типа с числом выводов 14. Подложки схем приклеиваются к основанию корпусов эпоксидными смолами и легкоплавкими стеклами. Приклеивание эпоксидными смолами используется и для крепления кремниевых кристаллов с активными элементами на подложки пленочных схем.

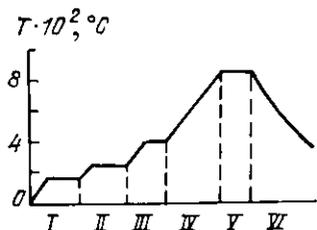


Рис. 8.5.

Рис. 8.5. Распределение температуры в печи для отжига паст

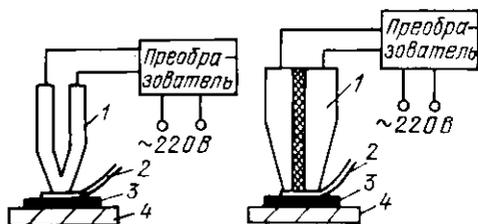


Рис. 8.6.

Рис. 8.7.

Рис. 8.6. Присоединение вывода методом сварки косвенным импульсным нагревом:

1 — электрод; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — основание установки для сварки

Рис. 8.7. Присоединение вывода методом сварки «двоенным электродом»:

1 — двоянный электрод; 2 — проволока; 3 — подложка; 4 — основание установки для сварки

В гибридных ИС нашли применение следующие методы монтажа.

Сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН) производится нагревом зерна импульсом тока (рис. 8.6). 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. Давление осуществляется массой 30—500 г 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 СКИН 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 окисных пленок на поверхности свариваемых металлов.

Сварка «двоенным электродом» осуществляется пропусканьем сварочного тока между двумя электродами, расположенными с одной стороны свариваемых деталей (рис. 8.7).

Используя «двоенные 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 применить эти методы для присоединения выводов к тонким пленкам.

Герметизация металлокерамических корпусов для ГИС осуществляется пайкой корпусов панельного типа — заливкой корпуса компаундом со стороны выводов.

Глава 9

Особенности технологии больших и сверхбольших интегральных микросхем

§ 9.1. Введение

Повышение степени интеграции полупроводниковых и гибридных ИС приводит к необходимости изменения стандартных технологических процессов их изготовления.

Особенностью технологии полупроводниковых БИС и СБИС является увеличение плотности упаковки элементов. При увеличении степени интеграции ИС площадь кристалла нельзя увеличивать пропорционально возрастанию числа расположенных на нем элементов. Такое увеличение площади вызвало бы рост количества дефектов (сквозных отверстий — проколов) в защитных пленках двуокиси кремния, что в свою очередь привело бы к резкому падению процента выхода годных схем. Поэтому повышение степени интеграции сопровождается увеличением плотности упаковки элементов. Так, увеличение степени интеграции на три порядка (например, от 20 до $2 \cdot 10^4$ элементов) привело к возрастанию площади кристалла только на порядок (примерно от 2,2 до 20 мм²).

Увеличение плотности упаковки элементов достигается уменьшением размеров элементов и размеров изолирующих областей. Ниже перечислены технологические процессы, разработка которых привела к увеличению плотности упаковки и способствует дальнейшему повышению степени интеграции полупроводниковых ИС.

Получение тонких эпитаксиальных слоев (1—3 мкм) с электрофизическими параметрами, приемлемыми для изготовления в этих слоях транзисторных структур, обеспечило возможность разработки изопланарной технологии.

Введение в технологический процесс ионно-плазменных и плазмохимических методов травления позволило приблизить размеры элементов ИС к размерам рисунков в фоторезистивных масках. Уменьшению последних способствуют развивающиеся новые направления в технике литографии — электронолитография, рентгенолучевая литография, — направленные на повышение разрешающей способности.

Разработка технологии многоуровневой металлизации не только позволила уменьшать размеры кристаллов за счет уменьшения площади металлической разводки, но и обеспечила функциональную сложность БИС и СБИС.

Технология гибридных БИС включает, в отличие от технологии ГИС, процесс изготовления коммутационных плат с многоуровне-

вой металлической разводкой. Коммутационные платы создаются по тонко- или толсто пленочной технологии и образуют совместно с навесными элементами (для гибридных ГИС — это бескорпусные ИС и БИС) функционально сложные устройства — микросборки.

§ 9.2. Методы получения субмикронных размеров элементов

Возможности контактной фотолитографии ограничены длиной волны излучения, к которому чувствительны разработанные фоторезисты, поскольку в результате дифракции света происходит расширение получаемого окна. При проекционной фотолитографии разрешающая способность снижается в результате интерференции при экспонировании в монохроматическом свете. При серийном производстве контактная фотолитография позволяет получать в слое фоторезиста минимальный размер 0,8 мкм, проекционная фотолитография 0,4 мкм. С учетом особенностей жидкостного химического травления этот размер в рабочих пленках увеличивается до 2,5—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 субмикронные размеры являются пределом разрешающей способности метода фотолитографии, что, безусловно, снижает точность воспроизведения размеров рисунков.

Поскольку минимальный размер элемента ИС 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 БИС и СБИС.

С уменьшением длины волны дифракционное рассеяние уменьшается. Поэтому перспективными являются разработки процессов литографии, направленные на использование коротковолнового УФ излучения, излучения в рентгеновском диапазоне, а также электронных пучков.

9.2.1. Электронолитография. Метод электронолитографии основан на использовании для экспонирования пленок резистов электронных пучков. При взаимодействии электронного пучка с резистом происходят разрывы в межатомных связях, приводящие к перестройке молекулярной структуры резиста. Длина волны электрона, ускоренного напряжением U , равна $\lambda \approx 10^{-4} \sqrt{150/U}$. Если $U = 15$ кВ, то $\lambda = 10^{-5}$ мкм, т. е. может быть на несколько порядков ниже длины волны светового излучения. При столь малых длинах волны 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 сфокусированным пучком электронов и установки для проекционной электронолитографии.

Схема установки для экспонирования резиста сфокусированным пучком представлена на рис. 9.1. Установка содержит электронную пушку, систему фокусирования и отклонения электронного пучка, систему перемещения по координатным осям предметного стола, на котором располагается экспонируемая подложка. Включение и отключение электронного пучка, его сканирование, а также управление предметным столиком осуществляется с помощью ЭВМ.

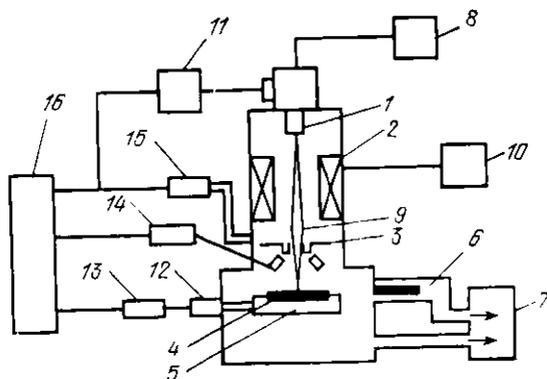


Рис. 9.1. Схема установки для экспонирования резиста сфокусированным пучком:

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

Скорость сканирования электронного пучка в таких установках составляет 100—400 мм/с, максимальная площадь сканирования 2×2 мм, максимальная площадь обработки 50×50 мм. Установка производит совмещение рисунков, которые получены на различных стадиях электронного экспонирования. Для этого при первом электронном экспонировании на подложке создаются специальные реперные метки. Если электронный пучок достигает реперной метки, то в цепи специального детектора отраженных электронов возникает сигнал. При последующих процессах экспонирования экспонируемый рисунок ориентируется относительно реперных меток, для чего предусмотрена соответствующая система.

Для оптимизации процесса экспонирования с целью получения минимального размера большое значение имеет правильный выбор ускоряющего напряжения. Это связано с тем, что от ускоряющего напряжения зависят минимальный диаметр сфокусированного пучка электронов и ореол их рассеяния, т. е. диаметр экспонированной области резиста. Вследствие рассеяния электронов и образования вторичных электронов с достаточно высокими энергиями размер области резиста, которая экспонируется электрона-

ми, больше, чем размеры электронного пучка. Оценки показывают, что минимально достижимый размер экспонируемой области равен сумме диаметра пучка электронов и толщины слоя резиста. Экспонирование сфокусированным лучом позволяют получить разрешающую способность 0,2 мкм.

Схема установки проекционной электронолитографии представлена на рис. 9.2. Основным элементом является освещаемый УФ 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 поверхности которой

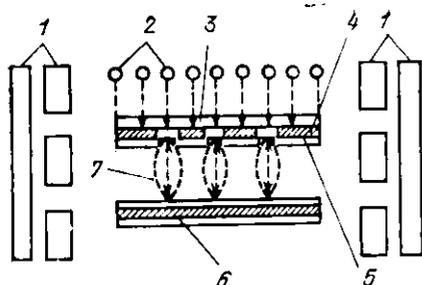


Рис. 9.2.

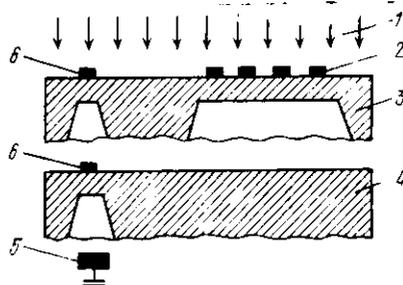


Рис. 9.3.

Рис. 9.2. Схема установки проекционной электронолитографии:

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

Рис. 9.3. 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

нанесена пленка двуокиси титана по рисунку, соответствующему одному из слоев ИС. На эту пленку напыляется сплошная пленка палладия толщиной около $4 \cdot 10^{-3}$ мкм. Выбор этих материалов основан на хорошем поглощении УФ света пленкой двуокиси титана и хорошими фотоэмиссионными свойствами палладия. Те участки палладия, которые не защищены двуокисью титана, под действием УФ света испускают электроны. Электроны вылетают под разными углами к поверхности, ускоряются электрическим полем, фокусируются и направляются на покрытую резистом подложку. Совмещение рисунков, как и для предыдущей установки, производится с помощью реперных меток, создаваемых в процессе первой литографии.

По сравнению с установкой экспонирования сфокусированным пучком данная установка отличается более высокой производительностью. Достигнутое разрешение при проекционной электронолитографии составляет 1 мкм.

Общий недостаток всех систем электронолитографии состоит в необходимости помещения подложек в вакуум, что в целом усложняет технологический процесс литографии. Исключить трудности технологического процесса электронолитографии при сохранении высокой разрешающей способности позволяет использование рентгеновского излучения.

9.2.2. Рентгенолучевая литография. При рентгенолучевой литографии поток мягких рентгеновских лучей (с длиной волны 0,4—1,4 нм) направляется на шаблон, под которым располагается под-

ложка, покрытая резистом, чувствительным к указанному излучению (рис. 9.3). Время экспонирования составляет несколько минут.

Выбор диапазона длин волн рентгеновского излучения обусловлен свойствами тех материалов (резистов), которые чувствительны к этому излучению, хорошо поглощают его и изменяют под его воздействием свою структуру. Кроме того, при выборе длин волн используемого рентгеновского излучения следует исходить из необходимости исключить поглощение излучения подложкой, которое становится достаточно сильным при $\lambda \approx 10$ нм. Найдены и разработаны органические материалы, которые обладают указанными свойствами в области рентгеновского излучения порядка 1 нм. При $\lambda < 1$ нм эти резисты становятся прозрачными.

Для изготовления шаблона можно использовать кремний. Кремний в виде тонких пленок (толщиной несколько микрон) прозрачен для рентгеновского излучения. Негативное изображение рисунка ИС (собственно защитная маска от рентгеновских лучей) создается из пленки золота толщиной около 0,3 мкм, нанесенной на тонкий слой кремния. Выбор золота обусловлен максимальной способностью к поглощению рентгеновских лучей по сравнению со всеми другими распространенными материалами.

Изготовление шаблона, в частности получение тонких кремниевых пленок, можно выполнить в результате проведения следующих технологических операций. 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 микрон. Площадь локально вытравленной области соответствует площади, занимаемой ИС. Процесс вытравливания для получения такой 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 сильно легированных слоев значительно ниже скорости травления высокоомного кремния. Поэтому процесс травления практически прекратится, когда травитель стравит кремний почти на всю толщину пластины и дойдет до диффузионного слоя.

Для совмещения шаблона и подложки рядом с основными углублениями вытравливают дополнительные, а на образовавшихся тонких слоях кремния располагают метки совмещения. Снизу подложки под меткой совмещения помещается детектор рентгеновских лучей, с помощью которого формируют сигнал рассогласования. Есть возможность полностью устранить тонкий кремниевый слой, а перемычку создать на основе трехслойной пленки нитрид кремния — двуокись кремния — нитрид кремния. В данном случае возможно обычное оптическое совмещение сквозь прозрачные окна.

В качестве источников рентгеновского излучения могут быть использованы рентгеновские трубки с электронно-лучевым испарением металлов с алюминиевых или медных мишеней. Ускоряющее напряжение составляет около 8 кВ. Перспективным является использование синхротронного излучения в качестве источника рентгеновских лучей. Минимальный размер, получаемый при рент-

генолучевой литографии, 0,1 мкм. Повышение разрешающей способности ограничено образованием вторичных электронов, способных вызывать структурные изменения в резисте, аналогичные происходящим при воздействии на резист рентгеновского излучения, и распространяющихся на расстоянии $\sim 0,1$ мкм.

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, рентгенолучевая литография проводится в безвакуумной среде. При этом используется более простое и более дешевое оборудование по сравнению с оборудованием при электронолитографии.

Рисунок на шаблоне создается методом электронолитографии, поскольку это практически единственный метод изготовить шаблон с высоким разрешением. Получение субмикронных размеров рисунка является комбинацией методов электронолитографии рентгенолучевой литографии.

§ 9.3. Ионное травление

Разработки и внедрение в технологию литографии процессов ионного травления направлены на преодоление тех недостатков, которые свойственны жидкостному травлению.

1. Отклонение размеров окон в пленке двуокиси кремния и металлических дорожек межсоединений от размеров рисунка в фоторезистивной маске. В результате бокового подтравливания под слоем фоторезиста увеличиваются размеры элементов ИС и уменьшается ширина дорожек межсоединений.

2. Неконтролируемые загрязнения поверхности пластины кремния из-за недостаточной очистки от примесей жидкостных травителей.

3. Трудоемкость операций химического травления и определенная сложность автоматизации этого процесса.

9.3.1. Ионно-плазменный метод травления. Разрушение мишени (катода) бомбардировкой ионов в плазме тлеющего разряда, используемое для нанесения тонких пленок (см. § 5.4), может иметь и самостоятельное значение. Если в качестве мишени используется кремниевая пластина с нанесенными на ее поверхность тонкими пленками, которые необходимо локально удалить, то в данном случае процесс разрушения поверхности мишени принято называть ионно-плазменным травлением. При этом в качестве защитной маски может использоваться материал с более низкой (по сравнению с пленкой) скоростью травления.

Основные закономерности процесса разрушения (травления) мишени уже были рассмотрены в гл. 5 и были установлены основные факторы, влияющие на скорость удаления материала мишени: энергия бомбардирующих ионов, коэффициент распыления, давление газа в рабочей камере, концентрация остаточных газов, угол

падения ионов на поверхность мишени. Однако при литографии всегда используется локальное травление, и без установления особенностей локального ионно-плазменного травления нельзя правильно выбрать режимы травления и материалы для создания маски.

Поток ионов может быть с достаточно высокой точностью направлен нормально к обрабатываемой поверхности пленки, при этом боковое подтравливание существенно ослабляется. Однако существуют факторы, нарушающие нормальное падение 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 защитной маски не являются вертикальными по всей глубине рельефа. Верхние углы маски имеют некоторое закругление, в силу чего на этих участках углы падения ионов*) снижаются, а скорость травления увеличивается. Поэтому первоначальные незначительные закругления на углах маски приводят к резко выраженному изменению профиля ее боковых стенок (рис. 9.4) 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.

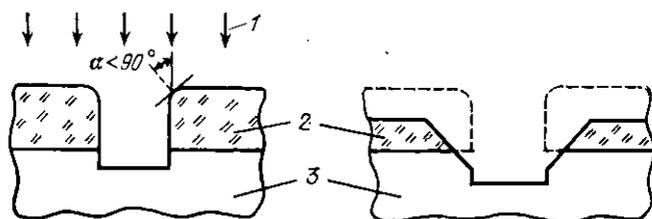


Рис. 9.4. Формы и размеры рисунка на начальной и более поздних стадиях травления:

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

При отклонении боковых стенок маски от вертикали на форму и размеры рисунка влияет также отражение ионов от боковых стенок маски. При снижении угла падения те ионы, которые отразились от боковой поверхности, увеличивают поток бомбардирующих ионов на некотором расстоянии δ от края маски (рис. 9.5). 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 пластин, например к коротким замыканиям при многоуровневой разводке межсоединений.

*) Отсчет ведется от поверхности.

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

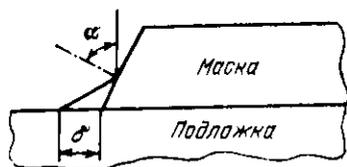


Рис. 9.5.

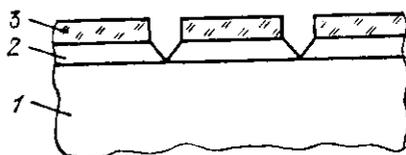


Рис. 9.6.

Рис. 9.5. Поток бомбардирующих ионов, возникающих из-за отражения от боковой стенки маски

Рис. 9.6. Замыкание металлических дорожек вследствие вытравленных областей V-образной формы:

1 — подложка; 2 — металлическая разводка; 3 — маска

Другим фактором, влияющим на форму рисунков, является переосаждение распыляемого материала. Поверхность травления является одновременно и приемной поверхностью для атомов, распыляемых с других участков вытравливаемой пленки. Скорость травления определяется соотношением количества материала, удаляемого с поверхности и принимаемого ею с других участков. Скорость травления значительно уменьшается из-за переосаждения при вытравливании узких канавок. При этом они приобретают V-образную форму, и результатом переосаждения могут явиться короткие замыкания между соседними дорожками межсоединений (рис. 9.6).

Учитывая рассмотренные факторы, можно сформулировать требования к маскам при использовании ионного травления. 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 переосаждения стравливаемого материала и снижения размеров элементов ИС 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 (ФР) из полимерных органических материалов, металлические и графитовые. Скорости травления ФР масок (0,4—0,85 нм/с) близки к скоростям травления Si (0,49 нм/с) и SiO₂ (0,44 нм/с). Поэтому при использовании этих масок глубина травления не должна превышать толщину маски. Для более точного вос-

произведения размеров и формы рисунков следует допускать только частичное протравливание маски (см. рис. 9.4), поэтому глубина травления не должна превышать примерно четверти толщины маски*). Толщина фоторезистивных масок обычно составляет 0,5—1,5 мкм. Повышение стойкости ФР масок к ионному травлению достигается некоторой модификацией обычного, применяемого в фотолитографии, процесса задувливания фоторезиста. Модификация заключается в использовании термообработки в среде азота или инертных газов, а не воздуха, а также в оптимизации температуры задувливания по стойкости к ионному травлению.

Недостатком ФР масок является резкое увеличение скорости их травления в зависимости от давления остаточных химически активных газов (водорода, кислорода, паров воды) в реакционной камере. Определенные трудности при использовании ФР масок возникают в силу их недостаточной термостойкости. Кроме того, в структуре фоторезистов при ионной бомбардировке происходят изменения, аналогичные тем, которые происходят при экспонировании. При этом фоторезисты становятся трудно растворимыми в химических реактивах, обычно используемых для их удаления.

Металлические маски получают из пленок Ti, Cr, V, Mo, Ta, используя либо обычную фотолитографию с жидкостными химическими реагентами, либо фотолитографию с применением ионного травления через ФР 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, SiO₂, Si₃N₄, влияет незначительно, металлические маски можно использовать для глубокого ионного травления этих материалов. Достоинством металлических масок является их высокая термостойкость, что позволяет повысить плотность ионного тока и увеличить 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 на удаление маски.

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

9.3.2. Плазмохимический метод травления. 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.

В технологии фотолитографии наиболее широкое распространение получил плазмохимический метод удаления фоторезистов. Он 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 фоторезистов 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

*1 Для различных ФР масок эти данные могут различаться.

объясняют их каталитическим действием в тех химических превращениях, которые приводят к появлению атомарного кислорода.

Схема установки для удаления фоторезиста в кислородной плазме представлена на рис. 9.7. Установка состоит из кварцевой реакционно-разрядной камеры, в которой создается ВЧ плазма,

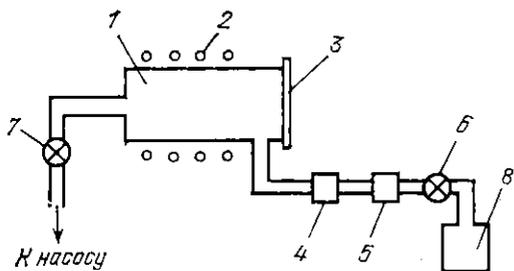


Рис. 9.7. Схема установки для плазмохимического удаления фоторезиста:

1 — разрядная камера; 2 — индуктор; 3 — крышка; 4 — нагнетатель; 5 — редуктор; 6, 7 — краны; 8 — источник газа

ВЧ генератора, обеспечивающего индукционное возбуждение газового разряда, газовой системы, позволяющей с контролируемой скоростью (обычно 100—1000 см³/мин) вводить кислород в реакционно-разрядную камеру, и откачной системы. Реакционно-разрядная камера работает в условиях постоянного натекания кислорода при непрерывной его откачке, при этом давление кислорода поддерживается на уровне 4 Па. Расположение индуктора вне реакционно-разрядной камеры повышает чистоту химических процессов.

§ 9.4. Многоуровневая металлическая разводка

Функциональная сложность БИС и СБИС затрудняет решение задач, связанных с созданием соединений между элементами. Система межсоединений, исключая многократные взаимные пересечения проводников, в таких схемах, как правило, не может быть реализована. Поэтому соединяющие проводники нельзя расположить в одной плоскости и приходится использовать многоуровневую металлическую разводку. Число уровней определяется логической структурой БИС или СБИС и их функциональной сложностью. Наиболее сложные схемы имеют до четырех уровней соединений. Схематично двухуровневая разводка для биполярной ИС представлена на рис. 9.8.

Технологические процессы изготовления 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 ИС. Однако при многоуровневой разводке к этим процессам предъявляются дополнительные требования, поскольку усиливается отрицательное влияние

электродиффузии, приводящей к перемещению материала металлических проводников на участках с повышенной плотностью тока. Результатом такого перемещения является образование разрывов и выступов на металлизированной дорожке. Если разрывы равно недопустимы как для одноуровневой, так и для многоуровневой разводки, то выступы (а они могут быть довольно острыми) приводят к дополнительным дефектам схемы именно в последнем случае, поскольку могут являться причиной нарушения сплошности межуровневого диэлектрического слоя и возникновения в силу этого коротких замыканий между проводниками разных уровней.

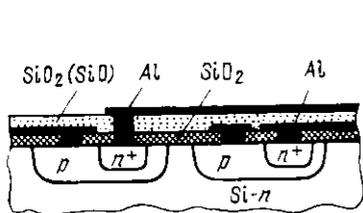


Рис. 9.8.

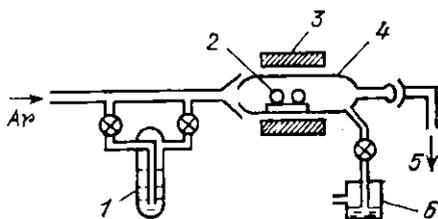


Рис. 9.9.

Рис. 9.8. Двухуровневая разводка в биполярных БИС

Рис. 9.9. Схема установки для получения двуокиси кремния разложением кремнийорганических соединений:

1 — исходный материал; 2 — пластины кремния; 3 — нагреватель; 4 — реакционная камера; 5 — выход к системе откачки; 6 — гидрозатвор

Металлические слои в ИС наносятся обычно на рельефную поверхность, образование которой связано с вытравливанием окон в защитных пленках двуокиси кремния. Ступеньки рельефа — это те участки, на которых наиболее вероятно образование разрывов в металлических дорожках вследствие как электродиффузии, так и механических напряжений, обусловленных различием в коэффициентах линейного расширения кремния и металла разводки. Увеличение числа уровней разводки приводит к увеличению количества ступенек и повышению вероятности разрывов проводников.

Процесс вскрытия контактных окон в диэлектрических слоях при многоуровневой разводке также имеет свои особенности. В БИС и СБИС уменьшаются ширина проводников и размеры контактных окон, а толщина межуровневого диэлектрика возрастает* по сравнению с защитным слоем SiO_2 . Это усложняет получение контактных окон заданных размеров и формы.

Сложность получения хорошего омического контакта между тонкими металлическими слоями может быть вызвана окислением поверхности металлических слоев в процессах их химической и термической обработки.

* Толщину диэлектрика целесообразно увеличивать для снижения паразитных МДМ-емкостей в местах пересечений проводников.

Перечисленные особенности и определенные трудности создания многоуровневой разводки заставляют вести поиск новых, более эффективных, технологических решений. Таковыми, в частности, являются электрохимические процессы, процессы химического осаждения из газовой фазы диэлектриков и металлов, ионное травление.

Межуровневый изолирующий слой получают либо вакуумным термическим напылением монооксида кремния (§ 5.3), либо химическим осаждением из газовой фазы двуоксида кремния. В последнем случае используется реакция химического разложения кремнийорганических соединений, например $\text{Si}(\text{OR})_4$, где R — органический радикал. Схема установки для получения двуоксида кремния разложением показана на рис. 9.9. Инертный газ пропускается через жидкий $\text{Si}(\text{OR})_4$. Образовавшаяся парогазовая смесь поступает в реакционную камеру, где располагаются подложки, нагретые до температуры разложения кремнийорганического соединения.

Электрохимическим анодным окислением (анодированием) алюминия можно создавать изолирующий слой из оксидов алюминия. Принцип электрохимического анодирования состоит в перемещении отрицательных ионов кислорода через электролит к аноду, которым является подложка с анодируемой пленкой. Использование алюминиевой разводки и изоляции из оксидов алюминия позволяет за счет комбинации толщины пленок алюминия снижать рельеф поверхности вплоть до получения планарной многоуровневой разводки. Для получения окон в изолирующих слоях используются ионно-плазменные и плазмохимические методы травления (§ 9.3).

Чтобы получить металлическую разводку, наиболее широко применяют алюминий. Это связано с достоинствами тонких пленок алюминия. Прежде всего они имеют высокую проводимость и хорошую адгезию к диэлектрическим слоям, образуют низкоомный омический контакт с кремнием. Для этого используют вакуумное термическое напыление. Недостатками этих пленок являются низкая стойкость к механическим повреждениям, более резко выраженная по сравнению с другими материалами электродиффузия, наличие на их поверхности пленки Al_2O_3 , затрудняющей образование низкоомных контактов между различными уровнями разводки.

В силу этих недостатков алюминиевых пленок разрабатываются технологические варианты многоуровневой разводки с использованием других металлов. Однако поскольку ни один металл, кроме алюминия, не обеспечивает одновременно хорошие проводимость, адгезию и омический контакт, то это могут быть только многослойные композиции проводящих материалов. Так, для создания омического контакта к кремнию в области контактного окна получают пленки силицидов некоторых металлов, например платины или палладия. На поверхность этих пленок и защитных пленок SiO_2 наносится слой молибдена или титана, обеспечивающий удовлетворительную адгезию к диэлектрикам, затем — слой золота для повышения проводимости проводящих дорожек и снова слой молибдена для улучшения адгезии к этим дорожкам межуровневого изолирующего слоя.

§ 9.5. Многоуровневые коммутационные платы для гибридных БИС

Активными элементами гибридных БИС являются полупроводниковые ИС и БИС. Объединение их в функционально сложную схему возможно на основе использования *коммутационных плат с многоуровневой разводкой*. В отдельных случаях на коммутационной плате кроме металлической разводки изготавливают пленочные резисторы, реже пленочные конденсаторы. Сейчас разработано и используется несколько технологических методов изготовления коммутационных плат.

Коммутационные платы можно изготавливать по тонко- или толстопленочной технологии. В первом случае диэлектрическим основанием является пластинка из ситалла, размер которой может достигать 48×60 мм. Металлическая разводка создается вакуумным термическим или ионно-плазменным напылением (гл. 5), межуровневая изоляция — теми же технологическими методами, которые используются при получении многоуровневой металлической разводки в полупроводниковых БИС. Разводка и контактные окна в диэлектрике формируются методами фотолитографии. Структура коммутационной платы представлена на рис. 9.10.

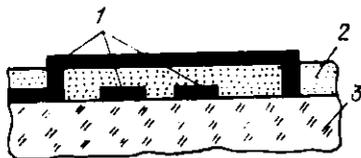


Рис. 9.10.

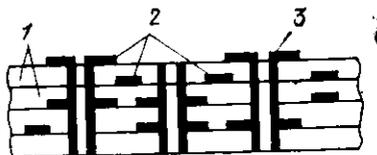


Рис. 9.11.

Рис. 9.10. Структура тонкопленочной коммутационной платы:

1 — металлическая разводка; 2 — межуровневая изоляция; 3 — ситалловая подложка

Рис. 9.11. Структура коммутационной платы на основе многослойной керамики с металлизированными переходными отверстиями:

1 — керамический лист; 2 — металлическая разводка; 3 — металлизированное переходное отверстие

В толстопленочной технологии диэлектрическим основанием является 96%-ная алюмооксидная керамика. Металлическая разводка и межуровневая изоляция создаются трафаретной печатью. Так же, как и для простых ГИС, для гибридных БИС методы тонкопленочной технологии по сравнению с толстопленочной позволяют уменьшить ширину соединительных проводников и получить более высокую плотность коммутации. По тонко- и толстопленочной технологии изготавливают платы, содержащие обычно не более двух уровней металлической разводки.

Для изготовления коммутационных плат можно использовать *многослойную керамику*. В этом случае число уровней разводки повышается до шести. Последовательность технологических операций при изготовлении многослойной керамики состоит в изготовлении керамических листов с отверстиями для межуровневых переходов, получении на этих листах металлической разводки методами толстопленочной технологии, металлизации отверстий, составлении из керамических листов пакета в соответствии с топологией разводки каждого уровня и спекании пакета.

Особенностью керамических листов, применяемых для изготовления плат, является их высокая эластичность. Керамические листы представляют смесь собственно керамического порошка и связующего полимера, полимеризующегося

под действием давления и температуры. Все операции до спекания (механическая обработка, металлизация, сборка в пакет) проводятся на сырых керамических листах. Спекание осуществляется в контролируемой газовой среде, на последней стадии — в вакууме. При выборе металлов для разводки необходимо учитывать, что их температура плавления должна быть выше температуры спекания керамики. Структура коммутационной платы на основе многослойной керамики с металлизированными переходными отверстиями представлена на рис. 9.11.

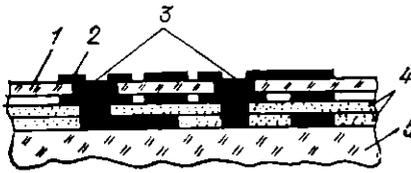


Рис. 9.12. Коммутационная плата на основе полиимидной пленки:

1 — полиимидная пленка; 2 — металлическая разводка; 3 — металлические столбиковые выводы; 4 — фоторезист; 5 — ситалловая подложка

Благодаря большой толщине межуровневого изоляционного слоя (до 100 мкм и более) эти коммутационные платы имеют более низкие паразитные емкости по сравнению с толстоленочными и особенно тонколеночными платами. Минимально возможная ширина проводников в них составляет 150 мкм, т. е. сравнима с шириной проводников в тонколеночных ИС, и несколько меньше, чем в толстоленочных (здесь 200—250 мкм).

Еще одним типом коммутационных плат являются платы на основе полиимидных пленок. Эти пленки представляют термостойкие высокомолекулярные соединения (допустимая температура термообработки — до 400°С). Последовательность технологических операций состоит в получении методом фотолитографии в полиимидной пленке (толщина ее составляет около 50 мкм) отверстий для межуровневых переходов и изготовлении металлической разводки на основе пленки Cr—Cu—Cr на обеих сторонах полиимидной пленки. Изготовленная таким способом полиимидная пленка монтируется с помощью столбиковых выводов на ситалловую подложку, на которой методами тонколеночной технологии уже создан первый уровень металлической разводки (рис. 9.12). Таким образом, с помощью полиимидной пленки можно получить трехуровневую разводку.

На коммутационные платы гибридных БИС монтируются бескорпусные полупроводниковые ИС с проводочными, балочными или шариковыми выводами

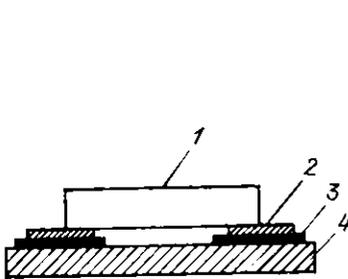


Рис. 9.13.

Рис. 9.13. Сборка кристалла с балочными выводами:

1 — кристалл кремния; 2 — балочный вывод; 3 — металлическая разводка; 4 — диэлектрическое основание (подложка или межуровневый изолирующий слой)

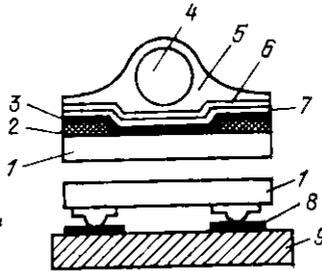


Рис. 9.14.

Рис. 9.14. Кристалл с шариковыми выводами (а) и его сборка (б):

1 — кристалл кремния; 2 — пленка SiO₂; 3 — пленка Al; 4 — медный шарик; 5 — сплав Sn+Pb; 6 — пленка Cu; 7 — пленка Cr; 8 — металлическая разводка; 9 — диэлектрическое основание (подложка или межуровневый изолирующий слой)

ми. В двух последних случаях сборка осуществляется по методу перевернутого кристалла (рис. 9.13 и 9.14).

Выбор конструкции коммутационной платы и технологии ее изготовления определяется функциональной сложностью создаваемой гибридной БИС, а выбор методов монтажа активных элементов — типом их внешних выводов.

Глава 10

Предмет и исходные предпосылки конструирования интегральных микросхем

§ 10.1. Принципы конструирования интегральных микросхем

Конструирование ИС состоит из следующих этапов: выбор структуры и электрофизических параметров подложки; формулировка требований к электрофизическим параметрам слоев, образующих элементы, и к компонентам; разработка топологии ИС; выбор корпуса и разработка комплекта документации на ИС. Исходными данными при конструировании ИС 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 (п. 7.3.1, табл. П.1, П.2). Технологический процесс является основой для первых двух этапов конструирования ИС. Если выработанные требования к параметрам подложки и диффузионных слоев не удовлетворяют базовому технологическому процессу, то режимы последнего необходимо корректировать.

Основной этап конструирования ИС — разработка их топологии. Она включает расчет геометрических размеров элементов, разработку эскизов топологии, определение необходимого количества изолированных областей (для полупроводниковых ИС), разработку вариантов топологии и ее оптимизацию. Главной и наиболее сложной частью разработки топологии является расчет геометрических размеров элементов, так как в основном от него зависят работоспособность ИС и ее надежность. Интеграция схемы на одном кристалле заключается в добавлении паразитных элементов: емкостей изолирующего $p-n$ -перехода; сопротивлений, возникающих при ликвидации пересечений; паразитных элементов межсоединений и др.

При разработке топологии БИС с относительно небольшим 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 ИС (ГИС) аналогична разработке топологии полупроводниковых ИС, но более ироста из-за больших размеров элементов и меньшей степени интеграции.

Выбор корпуса (см. пп. 7.3.3; 8.6.3, табл. П.3) определяется необходимым числом выводов, размером подложки или кристалла и назначением ИС.

В комплекте документации на ИС должна содержаться полная информация о технологии изготовления ИС, ее конструкции, назначении, нормах на параметры, режимах испытаний и др. Упрощение конструирования ИС достигается автоматизацией выпуска конструкторской документации.

Каждый тип ИС (см. гл. 7, 8) имеет свои особенности конструирования, которые определяются технологией изготовления ИС, используемой элементной базой и наличием компонентов.

При заданном базовом технологическом процессе (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 ИС.

§ 10.2. Типы интегральных микросхем, их элементы и компоненты

В настоящее время среди типов ИС (полупроводниковые, пленочные и гибридные) доминирующее положение занимают полупроводниковые ИС. На одном кристалле изготавливаются ИС с числом элементов до нескольких десятков тысяч. Объем выпуска полупроводниковых ИС более чем на порядок превышает объем выпуска ГИС. Однако это не снижает значимости последних. Есть типы ИС, которые имеют лучшие показатели, если их изготавливать в виде ГИС. К ним относятся:

1) ИС, где требуется либо высокая точность элементов и возможность их подстройки (прецизионные, высокочастотные и др.), либо значительная мощность;

2) ИС частного применения (преобразователи аналог—код, схемы питания и др.); это связано с относительной простотой технологии изготовления ГИС по сравнению с технологией изготовления полупроводниковых ИС;

3) ИС СВЧ диапазона.

Кроме того, технологические методы изготовления ГИС открывают возможности для замены ими методов многослойного печатного монтажа и позволяют повысить функциональную сложность схемы, так как в качестве компонентов могут использоваться ИС и даже БИС. Поэтому ГИС являются не конкурентом полупроводниковых ИС, а дополнением последних, расширяющим возможности ИС.

*) Для полупроводниковых ИС.

В полупроводниковых ИС все схемные элементы изготавливаются в приповерхностном слое и на поверхности полупроводниковой пластины. Пассивными элементами в полупроводниковых ИС являются резисторы и конденсаторы, активными — биполярные и МДП-транзисторы, диоды, транзисторы с барьером Шотки и др.

В ГИС 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 нескольких микрогенри.

Таблица 10.1. Параметры пассивных элементов ИС

Тип ИС	Резисторы			Конденсаторы		
	R_{\min} , Ом	R_{\max} , кОм	δ , %	C_{\min} , пФ	C_{\max} , пФ	δ , %
Полупроводниковая	Единицы	Сотни	15 — 20	—	200	20
Гибридная	То же	Тысячи	15 — 20	Единицы	10000	15 — 20
тонкопленочная	«	Сотни	50	50	2500	15 — 20
толстопленочная						

Из табл. 10.1 видно, что номиналы элементов пленочных ИС превышают соответствующие значения номиналов элементов для полупроводниковых ИС 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 десятых долей, а в отдельных случаях и до сотых долей процента. Указанное отличие позволяет получать прецизионные пленочные ИС и ГИС.

В качестве навесных компонентов используются активные приборы (диоды, биполярные и униполярные транзисторы, ИС и даже БИС), а также пассивные элементы больших номиналов.

§ 10.3. Задачи расчета параметров элементов

Как было указано, одним из наиболее важных этапов разработки топологии полупроводниковых ИС является определение геометрических размеров элементов, особенно активных, электрофизических характеристик полупроводниковых пластин, диффузионных слоев. Для этой цели используют уравнения непрерывности, Пуассона, а также уравнения, определяющие плотность тока и распределение примесей в рабочих слоях. При определении геометрических размеров элементов ГИС использовать указанные выше уравнения нет необходимости.

10.3.1. Основные параметры элементов ИС. Полупроводниковые ИС. 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: максимальный рабочий ток; погонные паразитные параметры — активное сопротивление, емкость и индуктивность, граничная частота. Для многослойной металлизации: те же параметры, что для межэлементных соединений. Для биполярных транзисторов: коэффициент усиления (передачи) тока и его температурный разброс; сопротивление 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 ω_{α} и ω_{β} . Для МДП-транзисторов: крутизна, пороговое напряжение, температурный разброс крутизны, температурный разброс порогового напряжения, постоянная времени крутизны, емкости затвор — исток, затвор — сток, исток — подложка, сопротивления истока и стока, исток — подложка, сток — подложка и др.

Пленочные ИС и ГИС. Для резисторов, конденсаторов, межэлементных соединений и многослойной металлизации характеристики те же, что и для элементов полупроводниковых ИС. Для катушек индуктивности: номинальная индуктивность L , ее допуск в заданном диапазоне частот, добротность на заданной частоте; собственная резонансная частота, определяемая индуктивностью и межвитковой паразитной емкостью.

10.3.2. Базовые уравнения. При расчете параметров элементов ИС используются следующие уравнения: Пуассона, непрерывности, переноса носителей, распределения концентрации примесей. В табл. 10.2 представлены основные электрические константы и параметры некоторых материалов, используемые при расчетах.

Наибольшее количество диффузионных слоев требуется для изготовления биполярного $n-p-n$ -транзистора, структура которого показана на рис. 10.1. Здесь d_0 и d_k — глубины залегания эмиттерного и коллекторного переходов; $d_{эп}$ — толщина эпитаксиальной пленки; ω_0 — ширина металлургической базы; ω — ширина собственно базы (штриховыми линиями показаны слои пространственных зарядов); L — длина эмиттера.

На рис. 10.2 представлены результирующее распределение примесей (непрерывная линия) и распределение примесей при базовой и эмиттерной диффузиях. Здесь $N_{ээ}$, $N_{эб}$ и N_k — поверхностные концентрации примесей при эмиттерной и базовой диффузиях и концентрация примесей в коллекторной области: $\Delta d_{эп}$, $\Delta d_{эп}$, $\Delta d_{кп}$ и $\Delta d_{кп}$ — толщина слоев пространственных зарядов в соответствующих областях. Распределение примесей определяется как

$$N(x) = N_a - N_d = N_{ээ} \operatorname{erfc}(x/d_{0э}) + N_{эб} \exp[-(x/d_{0б})^2] - N_k \quad (10.1a)$$

Таблица 10.2. Основные электрические константы и параметры некоторых материалов, используемых при расчете параметров элементов полупроводниковых ИС

Константы и параметры	Значения
Элементарный заряд q , Кл	$1,6 \cdot 10^{-19}$
Постоянная Больцмана k , Дж/°С	$1,37 \cdot 10^{-23}$
Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума) ϵ_0 , Ф/см	$8,85 \cdot 10^{-14}$
Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума) μ_0 , Гн/см	$4\pi \cdot 10^{-9}$
Ширина запрещенной зоны кремния, В:	
при $T=0$ К, Φ_{30}	1,21
при $T=300$ К, Φ_3	1,12
Собственная концентрация n_i^* , см $^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{10}$
Диэлектрическая проницаемость ϵ^* , отн. ед.:	
Si	11,7
SiO $_2$	3,9
SiO	5—6
Si $_3$ N $_4$	7,5
Al $_2$ O $_3$	8—9

*) При $T=300$ К.

Постоянные d_{03} и d_{06}^* находятся из заданных d_3 , d_k , N_{s3} , N_{s6} и N_k . Распределение примесей $|N(x)|$ представлено для $N_{s3} = 5 \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$;

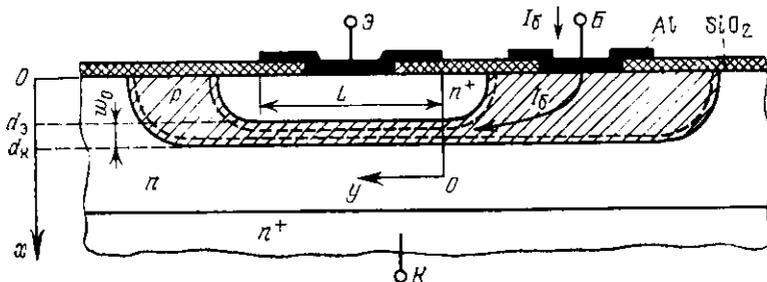


Рис. 10.1. Структура дискретного биполярного $n-p-n$ -транзистора

$N_{s6} = 5 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$; $d_3 = 1,7$ мкм; $d_k = 2,4$ мкм; $d_{03} = 0,683$ мкм; $d_{06} = 0,964$ мкм. Результирующее распределение (10.1а) можно представить с малой погрешностью в виде

$$N(x) \approx -N_{s3} \exp[-(x/d_{03})^2] + N_{s6} \exp[-(x/d_{06})^2] - N_k. \quad (10.16)$$

Из соотношения (10.16)

$$d_{06} \approx d_k [\ln(N_{s6}/N_k)]^{-1/2}; \quad (10.2a)$$

$$d_{03} \approx d_3 [\ln(N_{s3}/N_1)]^{-1/2}, \quad (10.26)$$

где $N_1 = N_{s6} \exp[-(d_3/d_{06})^2] - N_k$.

*) Величина $d_0 = 2\sqrt{Dt}$ (см. § 3.2).

Для распределения, показанного на рис. 10.2 и описываемого выражением (10.16), $d_{03}=0,612$ мкм; $d_{06}=0,964$ мкм.

При расчете электрических характеристик транзисторов часто аппроксимируют распределение примесей простой экспоненциальной функцией

$$N(x) = N_0 \exp(-x/d_0). \quad (10.3)$$

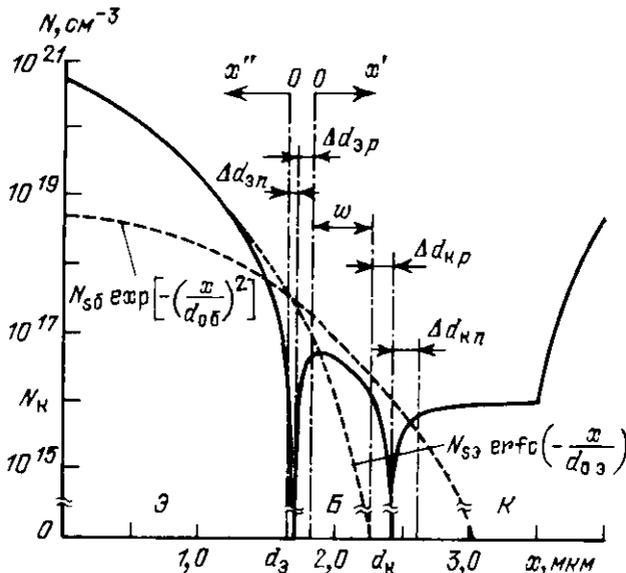


Рис. 10.2. Распределение примесей в биполярном $n-p-n$ -транзисторе

Погрешность такой аппроксимации уменьшается при уменьшении перепада концентраций и толщин соответствующих областей. При перепаде в полтора порядка и толщине области 0,7 мкм ошибка аппроксимации не превышает 50%.

Глава 11

Электрофизические параметры структуры интегральных микросхем

§ 11.1. Рабочие слои интегральных микросхем

Наибольшее количество слоев имеют ИС на основе биполярных транзисторов (см. рис. 10.1): эмиттерный, базовый, скрытый n^+ -слой, диффузионные и коллекторный слой, подложка p -типа (при изоляции $p-n$ -переходом). Для изготовления ИС на основе

МДП-транзисторов необходим лишь один диффузионный слой*) (рис. 11.1). В биполярных ИС удельное сопротивление коллекторной области (эпитаксиальной пленки) $\rho_k = 0,1 \div 5,0$ Ом·см, что соответствует концентрации $N_k = 10^{15} \div 10^{17}$ см⁻³ (см. рис. П.1),

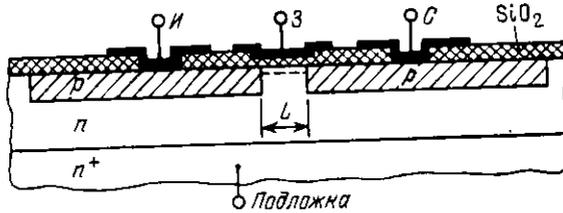


Рис. 11.1. Структура МДП-транзистора с индуцированным p -каналом

удельное сопротивление пластины p -типа обычно составляет 10 Ом·см, а соответствующая концентрация примесей $N = 1,4 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (см. рис. П.1). Толщины слоев: $d_s = 1,0 \div 2,5$ мкм, $d_{э,п} = 5 \div 15$ мкм, $d_k = 2,0 \div 3,5$ мкм и толщина n^+ -слоя 3—8 мкм; поверхностные концентрации примесей: $N_{s3} = 10^{19} \div 5 \cdot 10^{20}$ см⁻³, $N_{s6} = 10^{17} \div 10^{19}$ см⁻³, толщина металлургической базы $w_0 = 0,5 \div 1,0$ мкм и среднее удельное сопротивление базовой области $\rho_0 = 0,1 \div 1,0$ Ом·см. В МДП-ИС удельное сопротивление подложки $1 \div 10$ Ом·см, глубина залегания истокового и стокового p — n -переходов 2—3 мкм.

Для полной характеристики электрических параметров слоев и переходов, образующих элементы ИС, необходимо знать толщины слоев пространственных зарядов p — n -переходов Δd , удельную емкость C_0 и ее зависимость от напряжения, удельные сопротивления слоев R_s , тепловые токи I_0 и разброс всех этих величин.

§ 11.2. Удельная барьерная емкость p — n -переходов

Удельная барьерная емкость p — n -перехода

$$C_0 = \epsilon_n \epsilon_0 / \Delta d \quad (11.1a)$$

или

$$C_0(U) = C_0(0) / (1 - U / \Delta \phi_0)^{1/n}, \quad (11.16)$$

где ϵ_n — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника; ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; U — напряжение на переходе; $\Delta \phi_0$ — контактная разность потенциалов; $C_0(0)$ — 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 пространствен-

*) При необходимости планарного вывода от подложки требуются два диффузионных слоя.

ного заряда. Реальный переход имеет $2 < n < 3$. Величина $\Delta\varphi_0$ определится выражением

$$\Delta\varphi_0 = \varphi_T \ln [N(d - \Delta d_{p0}) N(d + \Delta d_{n0}) / n_i^2], \quad (11.2)$$

где d — глубина залегания перехода; Δd_{n0} , Δd_{p0} — толщины 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 $\Delta\varphi_0$ эмиттерного и коллекторного переходов равны 0,78—0,82 и 0,6—0,7 В соответственно.

Из формулы (11.16) следует, что при $U = \Delta\varphi_0$ барьерная емкость обращается в бесконечность. На практике это оказывается неверным, поэтому при оценке $C_0(U)$ ($U \approx \Delta\varphi_0$) либо используются завышенные значения $\Delta\varphi_0$ в формуле (11.16), либо применяется другая полуэмпирическая формула

$$C_0(U) = \frac{C_0(0)}{[(1 - U/\Delta\varphi_0)^2 + b]^{1/2n}} \left\{ 1 + \frac{b}{(n-1)[(1 - U/\Delta\varphi_0)^2 + b]} \right\}, \quad (11.3a)$$

где $b \ll 1$ — постоянная. Из анализа формулы (11.3a) следует, что при $U = \Delta\varphi_0$ барьерная емкость достигает максимума:

$$C_{0 \max}(\Delta\varphi_0) = n C_0(0) / [(n-1) b^{1/2n}]. \quad (11.3b)$$

При $U > \Delta\varphi_0$ 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 (11.16).

Характерная особенность емкости планарного перехода связана с неодинаковой глубиной залегания перехода по направлениям, перпендикулярному к поверхности полупроводника [$x(d)$] и параллельному поверхности [$y(d')$, см. рис. 10.1]. Это приводит к различным удельным емкостям донной и боковой частей перехода и в первую очередь относится к эмиттерному переходу. Обычно $d'_s/d_s = 0,3-0,5$, что означает существенное превышение удельной емкости боковой поверхности эмиттерного перехода ($C_{об}$) удельной емкости донной части ($C_{од}$): $C_{об} = (2-3)C_{од}$. Для коллекторного перехода $d'_k/d_k = 0,85 \div 0,95$, или $d'_k/d_k \approx 1$, т. е. боковую часть коллекторного перехода можно считать четвертью окружности с радиусом d_k , а также считать одинаковыми удельные емкости боковой поверхности и донной части.

Значение n (11.3) находят из решения уравнения Пуассона для каждого конкретного перехода. Это связано с большими трудностями при вычислении. Поэтому на практике пользуются расчетными номограммами Лоуренса — Уорнера, построенными на основе численного решения соответствующих уравнений. Решение осуществляется при условии постоянства исходной концентрации примесей в базовой области перехода *) ($N_{исх}$) и распределения

*) В биполярном транзисторе этому соответствует коллекторный $p-n$ -переход.

концентрации примеси в эмиттерной области перехода по функции Гаусса или дополнительной функции ошибок. С помощью номограмм можно определить толщины слоев пространственных зарядов и удельные емкости переходов при различных напряжениях смещения.

На рис. 11.2 представлены номограммы для $N_{исх}/N_s=10^{-3}$. Здесь N_s — поверхностная концентрация примесей в эмиттерной области; $U_{п}=-U+\Delta\phi_0$ — полная разность потенциалов на переходе; $\Delta d'$ — толщина слоя пространственного заряда в эмиттер-

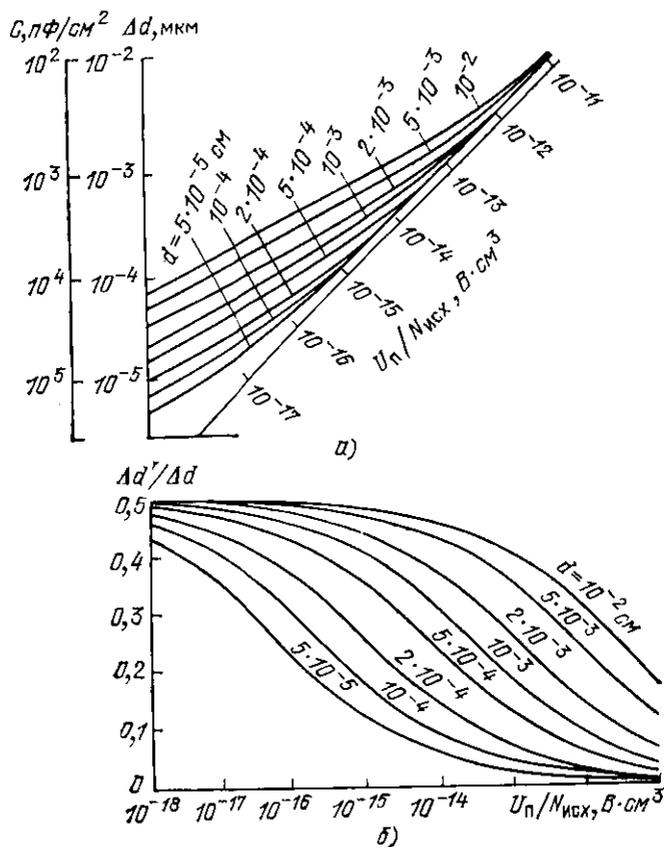


Рис. 11.2. Номограммы Лоуренса — Уорнера для определения удельной барьерной емкости плавного $p-n$ -перехода и толщины слоя его пространственного заряда (а) и распределения толщин слоев по областям p - и n -типов (б)

ной части перехода. Кривые построены в предположении гауссовского распределения примесей и справедливы в диапазоне $3 \cdot 10^{-4} \leq N_{исх}/N_s \leq 3 \cdot 10^{-3}$. На рис. П.2 представлены номограммы Лоуренса — Уорнера для $N_{исх}/N_s=10^{-2}$ и 10^{-4} при гауссовском рас-

пределении примесей*) для коллекторного перехода транзистора. Однако их можно использовать и при расчете удельной емкости эмиттерного перехода. Для этого в качестве исходной следует брать концентрацию акцепторной примеси в точке d_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 Δd_n и заниженное Δd_p , а значение Δd приблизительно будет соответствовать реальному значению. 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**).

Изолирующий переход в ИС (см. рис. 7.1) 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—110 пФ/мм², для боковой — 90—320 пФ/мм²***).

Пример. Определить удельные емкости донной части эмиттерного и коллекторного переходов. Рассматриваемые переходы имеют характеристики, указанные в п. 10.3.2 (см. также рис. 10.2): $d_s=1,7$ мкм; $d_K=2,4$ мкм; $N_{s0}=5 \cdot 10^{20}$ см⁻³; $N_{a0}=5 \cdot 10^{18}$ см⁻³; $N_{исх}=N_K=10^{16}$ см⁻³.

Донная часть эмиттерного $p-n$ -перехода. Примем $\Delta\phi_0=0,8$ В. Концентрация акцепторной примеси в точке d_s равна $N_a(d_s)=2,23 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $N_a(d_s)/N_{a0}=4,5 \cdot 10^{-2}$. Воспользуемся номограммами Лоуренса — Уорнера, представленными на рис. П.2,а. С их помощью составлена табл. 11.1. Из со-

Таблица 11.1. Параметры эмиттерного перехода

Параметр	U, В			
	0,3	0	-0,3	-2
$(U_n/N_{исх}) \cdot 10^{16}$, В·см ³	1,8	3,6	5,0	12,5
Δd_s , мкм	0,14	0,18	0,20	0,28
$C_{од}$, пФ/мм ²	740	580	500	400

Таблица 11.2. Параметры коллекторного перехода

Параметр	U, В			
	0	-1	-3	-7
$(U_n/N_{исх}) \cdot 10^{16}$ В·см ³	0,7	1,7	3,7	7,7
Δd_p , мкм	0,18	0,23	0,26	0,35
Δd_n , мкм	0,26	0,42	0,56	0,85
C_0 , пФ/мм ²	220	160	120	85

*) Номограммы, соответствующие распределениям Гаусса и дополнительной функции ошибок, близки.

**) При напряжении на переходе $U=0$.

отношений (11.16) и (11.3а) $n \approx 2,2$ и $b \approx 0,02$. Максимальное значение, найденное из выражения (11.3б), $C_{од\ max} \approx 2600$ пФ/мм².

Коллекторный $p-n$ -переход. Примем $\Delta\phi_0 = 0,7$ В; $N_{исх}/N_{б0} = 5 \cdot 10^{-3}$. Воспользуемся кривыми рис. 11.2, и с их помощью составим табл. 11.2. Соответствующее значение $n = 2,75$ в формуле (11.16).

§ 11.3. Напряжение пробоя $p-n$ -перехода

Пробой коллекторного перехода транзистора определяется лавинным умножением, которое происходит при напряженности электрического поля $E_{max} \approx 3 \cdot 10^5$ В/см. Решение уравнения Пуассона, проведенное Лоуренсом и Уорнером, позволяет также определить напряжение пробоя $U_{пр}$. На рис. 11.3 представлены номограммы, по которым можно найти $U_{пр}$ при гауссовском распределении при-

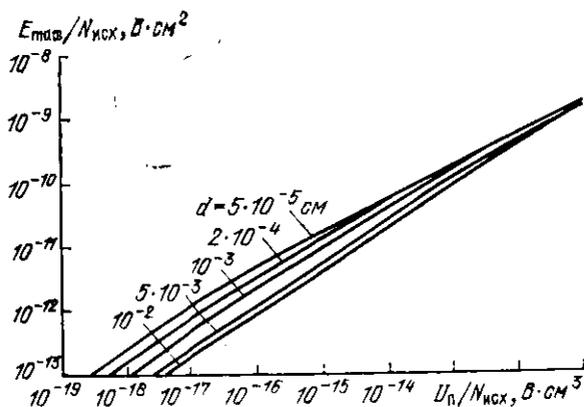


Рис. 11.3. Номограммы Лоуренса — Уорнера для определения напряжения пробоя плавного $p-n$ -перехода

месяей. Кривые построены для плоского перехода в диапазоне $10^{-5} \leq U_{пр}/N_{исх} \leq 10^{-2}$ В·см³. Учет искривления перехода на его границах вызывает увеличение в этих местах напряженности поля по сравнению с плоской частью. Поэтому пробой планарных переходов происходит на периферийных частях, вызывая некоторое уменьшение $U_{пр}$ по сравнению со значением, полученным из рис. 11.3. На рис. 11.4 представлена зависимость $U_{пр}$ ступенчатого перехода от величины закругления. Предполагается, что на пери-

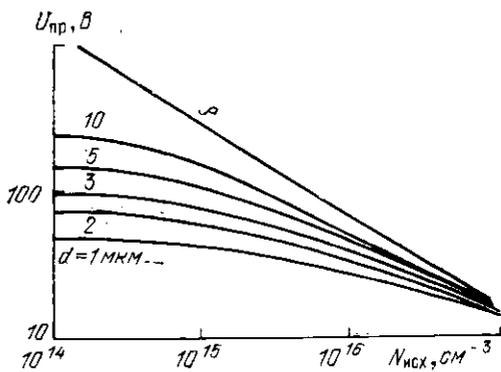


Рис. 11.4. Номограммы для определения напряжения пробоя ступенчатого $p-n$ -перехода

ферийных частях перехода он представляет четверть окружности радиусом d . Из рисунка видно, что влияние периферийных частей уменьшается при увеличении концентрации примеси в исходном материале. Кроме того, $U_{пр}$ плавного перехода будет меньше, чем ступенчатого, при $d = \infty$. Поэтому для оценочных расчетов при $d = 2-10$ мкм и $N_{исх} \geq 10^{16}$ см $^{-3}$ напряжение $U_{пр}$, 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, $E_{max}/N_{исх} \approx 3 \cdot 10^{-11}$ В·см 2 и $d_k = 2,4$ мкм, получаем $U_{п}/N_{исх} = 4 \cdot 10^{-15}$ В·см 3 и $U_{п} = -U_{пр} + \Delta\phi_0 = 40$ В, поэтому $U_{пр} \approx 40$ 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 (d_0)],

$$R_s = \bar{\rho}/d_0 = 1/(\bar{\sigma} d_0). \quad (11.4)$$

Однако для нахождения R_s , когда неизвестны $\bar{\rho}$ или $\bar{\sigma}$, 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 базового слоя может меняться приблизительно от 100 до 300 Ом/□, базового, ограниченного эмиттерным слоем, — от 5 до 20 кОм/□, скрытого n^+ -слоя — от 5 до 15 Ом/□, а эмиттерного — лишь в диапазоне от 2 до 5 Ом/□. Поэтому рассмотрим подробнее лишь два первых слоя.

11.4.1. Базовый слой. Для определения удельного сопротивления слоя (см. рис. 10.1, 10.2) найдем его удельную проводимость

$$G_s = q \int_0^{d_k} \mu_p(N_a) N_a(x) dx, \quad (11.5)$$

где $\mu_p(N_a)$ — зависимость подвижности дырок от концентрации акцепторной примеси; $N_a(x)$ — зависимость последней от координаты.

На рис. 11.5 показаны зависимости подвижности носителей от концентрации примесей. Из рисунка видно, что для диффузионной p -области при концентрации акцепторов $3 \cdot 10^{15} \leq N_a \leq 3 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ зависимость $\mu_p(N_a)$ в логарифмическом масштабе приблизительно линейна и ее можно представить в виде

$$\ln \mu_p \approx \ln K + m \ln N_a, \quad (11.6a)$$

где μ_p — подвижность дырок, см 2 /(В·с); N_a — концентрация акцепторов, см $^{-3}$; K и m — постоянные. На линейном участке (см.

рис. 11.5) имеем: при $N_a = 10^{16} \text{ см}^{-3}$ $\mu_p = 400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, а при $N_a = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ $\mu_p = 130 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Тогда

$$\ln K = 15,00 \text{ и } m = -0,245. \quad (11.66)$$

Из (11.6а) зависимость подвижности от концентрации

$$\mu_p = KN_a^m. \quad (11.7)$$

Подставляя (11.7) в (11.5), учитывая (10.1) при условии $N_{s6} \gg N_k$, получаем

$$G_s = q KN_{s6}^{m+1} \int_0^{d_k} \exp[-(m+1)(x/d_{06})^2] dx. \quad (11.8)$$

Интеграл в (11.8) не имеет аналитического решения. Для того чтобы произвести интегрирование, необходимо заменить d_k на ∞ . Как показывают рас-

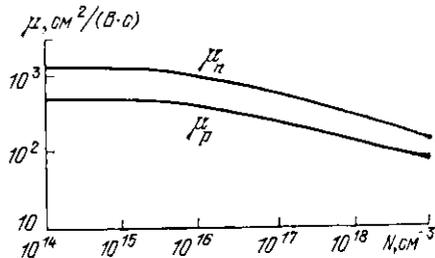


Рис. 11.5. Зависимость подвижности носителей от концентрации примесей в полупроводниковой пластине

четы, такая замена дает ошибку, не превышающую 1,5—2%. Осуществляя указанную замену и производя интегрирование, получаем

$$G_s = (qKd_{06} N_{s6}^{m+1}/2) \sqrt{\pi/(m+1)}. \quad (11.9a)$$

При этом соответствующее удельное сопротивление слоя

$$R_s = [2/(qKd_{06} N_{s6}^{m+1})] \sqrt{(m+1)/\pi}. \quad (11.96)$$

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 (11.96) с учетом (11.66) $R_s \approx 150 \text{ Ом}/\square$, а из номограмм Ирвина (см. рис. 3.19) при $x/d = 0$ имеем $\bar{\sigma} = 23 \text{ (Ом} \cdot \text{см)}^{-1}$, а соответствующее

$$R_s = 1/[\bar{\sigma}(d-x)] \approx 180 \text{ Ом}/\square.$$

Как видно, полученные значения близки.

11.4.2. 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. Предпочтителен аналитический расчет. Средняя проводимость базовой области

$$\sigma_6 = q \mu_p \bar{N}_6 = q \mu_p N_{\Gamma}/\omega, \quad (11.10)$$

где μ_p — подвижность дырок при концентрации акцепторной при-

меси \bar{N}_6 ; N_Γ — число Гуммеля (определяет удельное количество акцепторной примеси в базовой области n - p - n -транзистора);

$$N_\Gamma := \int_0^w N_6(x) dx. \quad (11.11)$$

Из соотношения (11.10) искомое удельное сопротивление слоя базовой области

$$R_s = (\sigma_6 \omega)^{-1} = (q \mu_p N_\Gamma)^{-1}. \quad (11.12)$$

Рассчитать N_Γ при распределении примесей даже в виде (10.16) аналитически невозможно. Для аппроксимации распределения удобно использовать следующее выражение:

$$N_6(x) = N_{\max 6} x \exp[(d_{\max 6} - x)/d_{\max 6}]/d_{\max 6}, \quad (11.13)$$

где координата x отсчитывается от металлургической границы эмиттерного перехода вглубь базовой области; $N_{\max 6}$ — максимальная концентрация примесей в базовой области; $d_{\max 6}$ — 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 (10.1а) $d_{\max 6}$ находится из решения трансцендентного уравнения

$$\begin{aligned} \exp\left[-\left(\frac{1}{d_{03}^2} - \frac{1}{d_{06}^2}\right)(d_{\max 6} + d_3)\right] = \\ = \frac{d_{03} \sqrt{\pi} N_{s6}}{d_{06}^2 N_{s3}} (d_{\max 6} + d_3). \end{aligned} \quad (11.14a)$$

При использовании аппроксимации дополнительной функции ошибок функцией Гаусса, обычно используемой при расчете полупроводниковых приборов [см. (10.16)],

$$d_{\max 6} = d_{03} d_{06} \left[\frac{1}{d_{06}^2 - d_{03}^2} \ln \left(\frac{N_{s3} d_{06}^2}{N_{s6} d_{03}^2} \right) \right]^{1/2} - d_3. \quad (11.14б)$$

Общая ошибка, возникающая при совместном использовании (10.16) и (11.14б), не превышает 15—20%. Используя выражения (11.11) и (11.13), получаем

$$\begin{aligned} N_\Gamma = N_{\max 6} d_{\max 6} \left[\exp\left(1 - \frac{\Delta d_{3p}}{d_{\max 6}}\right) \left(\frac{\Delta d_{3p}}{d_{\max 6}} + 1\right) - \right. \\ \left. - \left(\frac{w + \Delta d_{3p}}{d_{\max 6}} + 1\right) \exp\left(1 - \frac{w + \Delta d_{3p}}{d_{\max 6}}\right) \right]. \end{aligned} \quad (11.15)$$

Рассмотренные соотношения позволяют определить величину R_s .

Пример. Рассчитать удельное сопротивление слоя с параметрами, приведенными в § 10.3, используя расчетное соотношение и номограммы Ирвина. Запирающее напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах $U_3 = -2$ В.

Из табл. 11.1, 11.2 при $U_3 = -2$ В находим $\Delta d_{3p} \approx 0,16$ мкм и $\Delta d_{kp} = 0,24$ мкм. Используя номограммы Ирвина (см. рис. 3.19) при $x = d_3 + \Delta d_{3p} = 1,86$ мкм, $d_k = 2,4$ мкм и $x/d_k \approx 0,77$, имеем $\sigma = 1,50$ (Ом·см)⁻¹. Эта проводимость меньше истинной σ_6 на величину проводимости области простран-

венного заряда коллекторного перехода $\Delta\sigma$. Значение последней найдем из этих же кривых при $x=d_n-\Delta d_{kp}=2,16$ мкм ($x/d_n=0,9$): $\Delta\sigma=0,52$ (Ом·см)⁻¹. Тогда проводимость базовой области $\sigma_6=\sigma+\Delta\sigma=2,02$ (Ом·см)⁻¹. Из (11.14б) имеем $d_{\max\sigma}=0,16$ мкм, а из рис. 10.2 или формулы (10.16) $N_{\max\sigma}=6,2\cdot 10^{16}$ см⁻³. Из выражения (11.15) получим $N_{\Gamma}=1,45\cdot 10^{12}$ см⁻², а при $w=d_n-d_0-\Delta d_{зр}-\Delta d_{kp}=0,3$ мкм имеем среднюю концентрацию примесей в базовой области $N_6=N_{\Gamma}/w=4,83\cdot 10^{16}$ см⁻³. Из рис. 11.5 или из соотношения (11.7) при $N_a=4,83\cdot 10^{16}$ см⁻³ получим $\mu_p=262$ см²/(В·с). Из (11.10) находим $\sigma_6\approx 2,0$ (Ом·см)⁻¹. Тогда из (11.4) при $d_0=0,3$ мкм имеем $R_s\approx 16,7$ кОм/□.

Значения σ_6 , полученные из расчетного соотношения и номограмм Ирвина, близки, что связано с большой толщиной слоев пространственных зарядов. Если же положить $\Delta d_{зр}=\Delta d_{kp}=0$, 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 , получаемые с помощью номограмм Ирвина, завышены.

§ 11.5. Тепловые токи p — n -переходов

Тепловые токи I_0 определяют «масштаб» вольт-амперных характеристик (ВАХ) p — n -переходов. В эмиттерном переходе n — p — n -транзистора (см. рис. 10.1 и 10.2) главной составляющей плотности теплового тока $j_{\Sigma 0}$ является электронная составляющая $j_{\Sigma 0n}$. Поэтому

$$j_{\Sigma 0} \approx j_{\Sigma 0n} = qn^2 D_n / N_{\Gamma}, \quad (11.16)$$

где $D_n = \varphi_T \mu_n$ — коэффициент диффузии неосновных носителей в базовой области, а $\varphi_T = kT/q$ — температурный потенциал*).

В коллекторном переходе необходимо учитывать как электронную, так и дырочную составляющие:

$$j_{\Sigma 0} = j_{\Sigma 0n} + j_{\Sigma 0p}. \quad (11.17)$$

Величина $j_{\Sigma 0n}$ определяется соотношением (11.16). При отсутствии эмиттерной области N_{Γ} будет определяться интегрированием по всей глубине базовой области:

$$N_{\Gamma} = \int_0^d N_n dx. \quad (11.18)$$

Для нахождения $j_{\Sigma 0p}$ необходимо знать 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 $\Delta d_{зп}$. Тогда при отсутствии скрытого n^+ -слоя

$$p_n(x) = p_n(0) \frac{\text{sh}[(\Delta d_{зп} - x)/L_p]}{\text{sh}(\Delta d_{зп}/L_p)}, \quad (11.19a)$$

а при его наличии

*) При $T=300$ К $\varphi_T=0,026$ В.

$$p_n(x) = p_n(0) \frac{\text{ch}[(\Delta d_{\text{эп}} - x)/L_p]}{\text{ch}(\Delta d_{\text{эп}}/L_p)}. \quad (11.196)$$

При нахождении выражений (11.19) использовались соответственно граничные условия

$$p_n(\Delta d_{\text{эп}}) = 0; \quad j_p(\Delta d_{\text{эп}}) = 0. \quad (11.20a); \quad (11.206)$$

Соотношение (11.206) определяет свойство «отражения» неосновных носителей ступенчатым $n-n^+$ -переходом, когда концентрация примесей в n^+ -области значительно превышает концентрацию в n -области. Дифференцируя выражения (11.19), получаем

$$j_{k0p} = [q D_p n^2_i / (L_p N_n)] \text{cth}(\Delta d_{\text{эп}}/L_p) \quad (11.21a)$$

при отсутствии скрытого n^+ -слоя,

$$j_{k0p} = [q D_p n^2_i / (L_p N_n)] \text{th}(\Delta d_{\text{эп}}/L_p) \quad (11.216)$$

при его наличии, где D_p и L_p — коэффициент диффузии и диффузионная длина неосновных носителей дырок в коллекторной области. Величина $L = \sqrt{D\tau}$, а τ — время жизни неосновных носителей.

Пример. Рассчитать плотность теплового тока донных частей переходов $n-p-n$ -транзистора с параметрами, приведенными в § 10.3, при наличии скрытого n^+ -слоя, используя данные примера п. 11.4.2 при напряжении на переходах $U=0$. Положим, что время жизни в коллекторной области $\tau_p = 100$ нс, в базовой $\tau_n = 30$ нс, $\Delta d_{\text{эп}} = 2,6$ мкм.

Из формулы (11.7) при $N_n = 10^{16}$ см $^{-3}$ получим $\mu_p = 400$ см 2 /(В·с). При $\varphi_T = 0,026$ В, $D_p = 10,4$ см 2 /с, $L_p = 10,2$ мкм. Из табл. 11.1 и 11.2 при $U=0$ получим $\Delta d_{ap} \approx 0,1$ мкм и $\Delta d_{kp} \approx 0,18$ мкм. Тогда при $\omega_0 = 0,7$ мкм из (11.15) получим $N_G \approx 1,9 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$. Средняя концентрация примесей в базовой области $N_0 = N_G / \omega = 4,5 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$, а соответствующее значение $\bar{\mu}_n \approx 700$ см 2 /(В·с) (см. рис. 11.15). Тогда $\bar{D}_n = 18,2$ см 2 /с. Из формул (11.16), (11.17), (11.21) с учетом значений $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл (см. табл. 10.2) получим: $j_{a0} \approx j_{a0n} = j_{k0n} = 3,4 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 ; $j_{k0p} = 0,1 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 ; $j_{n0} = 3,5 \cdot 10^{-10}$ А/см 2 .

§ 11.6. Разброс параметров слоев

При анализе влияния разброса параметров слоев на параметры элемента или ИС в целом могут использоваться методы теории вероятности. Здесь необходимо определить влияние входных параметров (x_i) на выходной параметр (y), а также определить влияние изменения первых на последний. Предположим, что

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N). \quad (11.22)$$

При случайном характере изменений величин x_i , а следовательно, и y они полностью определяются своими законами распределения. Для характеристики последних обычно используются математическое ожидание (среднее значение отклонений) и среднее квадратическое отклонение (стандартная погрешность). Обозначим через e_{ij} отклонение j -го значения x_i от своего номинального значения ($e_{ij} = \Delta x_{ij}$).

Математическое ожидание для дискретных величин

$$\bar{e}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_{ij} m_j, \quad (11.23a)$$

где n — общее число отклонений; m_j — число одинаковых отклонений. Для непрерывно изменяемой случайной величины ε_i математическое ожидание

$$\bar{\varepsilon}_i = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_i \varphi(\varepsilon_i) d\varepsilon_i, \quad (11.23б)$$

где $\varphi(\varepsilon_i)$ — плотность распределения случайной величины ε_i . Среднее квадратическое отклонение для дискретной случайной величины

$$\sigma_i = \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{ij} - \bar{\varepsilon}_i)^2 m_j \right]^{1/2}, \quad (11.24а)$$

для непрерывной случайной величины

$$\sigma_i = \left[\int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon_i^2 \varphi(\varepsilon_i) d\varepsilon_i \right]^{1/2}. \quad (11.24б)$$

Распределение случайных величин может подчиняться различным законам: нормальному, равновероятностному, симметричному, многовершинному и др. Однако при достаточно большом количестве возможных состояний n закон распределения величин ε_i может быть принят за нормальный:

$$\varphi(\varepsilon_i) = \frac{\exp \left[-(\varepsilon_i - \bar{\varepsilon}_i)^2 / 2\sigma_i^2 \right]}{\sigma_i \sqrt{2\pi}}. \quad (11.25)$$

Для определения изменения выходного параметра от Δx_i продифференцируем (11.22):

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_N} \Delta x_N. \quad (11.26)$$

В рассмотренных выше формулах величины Δy , Δx_i и σ_i являются размерными. Однако при расчете разброса выходного параметра y необходимо суммировать разбросы значений, имеющих различную природу (как физическую, так и геометрическую). Поэтому удобнее пользоваться относительными величинами $\Delta y/y$, $\Delta x_i/x_i$ и соответствующими относительными средним квадратическим отклонением σ_i и разбросом номиналов δ_i .

Из уравнения (11.26)

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^N A_i \frac{\Delta x_i}{x_i}, \quad (11.27а)$$

где коэффициент влияния i -го элемента на выходной параметр

$$A_i = \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{x_i}{f} \right)_0 \quad (11.27б)$$

(индекс «нуль» у круглых скобок соответствует номинальным значениям параметров). Расчет в соответствии с уравнением (11.27а) при наиболее неблагоприятном сочетании разбросов Δx_i соответствует расчету по наихудшему случаю. Это исключает возможные ошибки. Однако в настоящее время наряду с последним используется метод, основанный на учете средних квадратических отклонений, несколько смягчающий требования к разбросу номиналов элементов. Используя правила суммирования случайных величин с учетом уравнения (11.27а), имеем для средних квадратических отклонений y

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 \sigma_i^2}. \quad (11.28а)$$

На практике удобнее проводить расчет с учетом относительного разброса номиналов δ_i^*). Введя коэффициент относительного рассеяния $b_i = \sigma_i / \delta_i$, выражение (11.28а) запишем в виде

$$\delta b = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 b_i^2 \delta_i^2}, \quad (11.28б)$$

$b_0 = \sigma_0 / \delta_0$ ($b_0 = 1/3$) и $K_i = b_i / b_0$, из (11.28б) получим

$$\delta = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 K_i^2 \delta_i^2}. \quad (11.29)$$

Величина $1/K$ характеризует вероятность (P_δ) того, что y имеет заданную погрешность δ . Как видно из интегрирования (11.25), при $K \leq 1^{**}$, $P_\delta \geq 0,9973$. Если некоторые из параметров x_i связаны корреляционными зависимостями, то (11.29) запишется как

$$\delta = \frac{1}{K} \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 K_i^2 \delta_i^2 + 2 \sum_{j < i} r_{ij} A_i A_j K_i K_j \delta_i \delta_j}, \quad (11.30)$$

где r_{ij} — коэффициент корреляции ($-1 < r_{ij} < 1$). Суммирование правой части подкоренного выражения производится по j для пар погрешностей, имеющих коррелятивные связи. Использование (11.30) позволяет оценить не только влияние допуска одного элемента на выходной параметр y , но и всех элементов в целом. Как правило, это относится только к ГИС.

Коэффициент корреляции A_i легко определяется либо аналитически, либо экспериментально. Нахождение r_{ij} требует больших статистических исследований для каждой конкретной ИС. Поэтому целесообразно упростить выражение (11.30). Для этого разделим все элементы схемы на группы (резисторы, конденсаторы), изготавливаемые на независимых технологических операциях. Тогда результирующее среднее квадратическое отклонение

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 \quad (11.31)$$

где m — число независимых групп; σ_j — среднее квадратическое отклонение выходного параметра y от разброса характеристик элементов j -го комплекса.

Для упрощения нахождения σ_j производится переход от функциональных погрешностей элементов (резисторы, конденсаторы) к погрешностям геометрических и физических параметров элементов (геометрические размеры элементов, сопротивление резистивной пленки и др.). Преимущество использования последнего способа связано с особенностями интегральной технологии изготовления пассивной части ГИС. При таком подходе отклонение какого-либо параметра элемента σ_{ji} (i -го элемента в j -м комплексе) можно разделить на взаимно независимые отклонения в пределах одной подложки (σ_{jin}) относительно его среднего значения на подложках всей партии ($\bar{\sigma}_{ji}$). Тогда

$$\sigma_{ji}^2 = A_{ji}^2 \sigma_{jin}^2 + A_{ji}^2 \bar{\sigma}_{ji}^2.$$

Величины отклонений σ_{jin} являются независимыми, а $\bar{\sigma}_{ji}$ имеют коэффициент корреляции, равный единице. Поэтому

$$\sigma_j^2 = \sum_{i=1}^{n_j} (A_{ji} \sigma_{jin})^2 + \left(\sum_{i=1}^{n_j} A_{ji} \bar{\sigma}_{ji} \right)^2, \quad (11.32)$$

*) Значение δ_i берется по модулю.

***) Значение $K=1$ соответствует $\sigma=3\delta$.

где n_j — число элементов i в j -м комплексе. Рисунок 11.6 иллюстрирует выражение (11.32) для $n_j=4$ и $\sigma_{jn}=\sigma_j$.

Как указывалось выше, рассмотренные вероятностные методы применяются главным образом для ГИС. Кроме того, анализ разбросов параметров элементов по наихудшему случаю более простой и гарантирует отсутствие возможных ошибок. Поэтому далее для простых конфигураций будет использоваться метод наихудшего случая*).

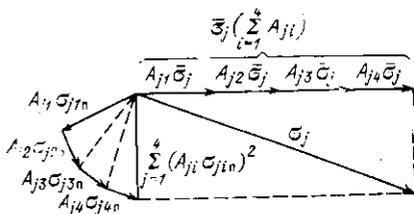


Рис. 11.6. Векторное сложение средне-квадратических отклонений

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 ИС. Отличие структуры транзистора как элемента ИС от структуры дискретного транзистора приводит к различию в электрических характеристиках. На рис. 12.1 показана

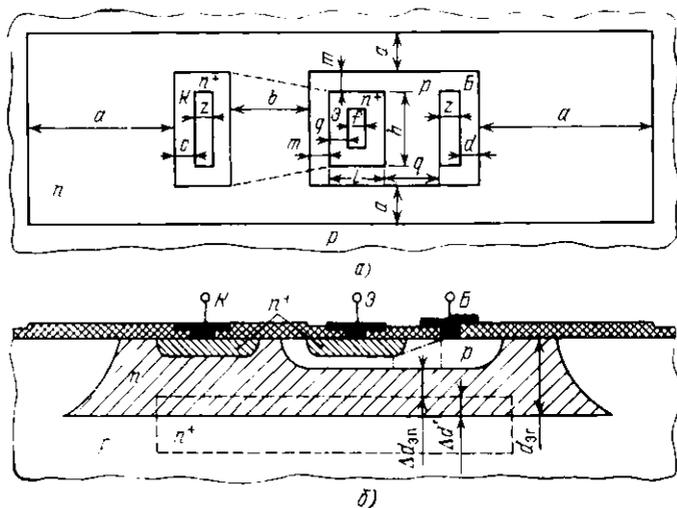


Рис. 12.1. Топология (а) и структура (б) интегрального биполярного транзистора

*) Сравнительный пример анализа разброса по методу наихудшего случая и вероятностному методу дан в п. 13.2.2.

структура $n-p-n$ -интегрального биполярного транзистора. В отличие от дискретного транзистора (см. рис. 10.1), в рассматриваемой структуре присутствует изолирующий $p-n$ -переход и все выводы расположены с одной стороны пластины. Параметры диффузионных слоев и подложки определяют параметры транзисторов и других элементов (резисторов и конденсаторов), входящих в состав ИС. 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.

12.1.1. Паразитный $p-n-p$ -транзистор. В ИС изолирующий переход должен быть закрыт, поэтому p -область полупроводниковой пластины 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 $C_{\text{вз}}$. Чтобы предотвратить отвлечение коллекторного тока $n-p-n$ -транзистора в p -слой подложки (когда $n-p-n$ -транзистор находится в насыщении), находящейся под напряжением E_{\min} , необходимо минимизировать коэффициент передачи $p-n-p$ -транзистора α_p . В ИС это обычно достигается созданием скрытого n^+ -слоя (см. штриховую линию на рис. 12.1).

Как следует из анализа выражений (11.19), (11.20), при наличии идеального $n-n^+$ -перехода (ступенчатого и с большим перепадом концентраций донорных примесей) $\alpha_p = 0$. Однако из-за «размытия» $n-n^+$ -перехода в процессе термообработок (см. п. 4.2.2) и влияния боковых частей изолирующего перехода $\alpha_p \approx 0$.

12.1.2. Сопротивление тела коллектора. От сопротивления тела коллектора $r_{\text{к.к}}$ зависит быстродействие $n-p-n$ -транзистора и падение напряжения на нем в насыщенном состоянии

$$U_{\text{ост}} = \Phi_T \ln \frac{\alpha_I (1 - 1/S)}{1 + B(1 - \alpha_I)/S} + I_{\text{к.н}} r_{\text{к.к}}, \quad (12.1)$$

где $S = BI_0/I_{\text{к.н}}$ — степень насыщения транзистора; I_0 и $I_{\text{к.н}}$ — его базовый и коллекторный токи. Для уменьшения сопротивления $r_{\text{к.к}}$ используется скрытый n^+ -слой.

Для расчета сопротивления $r_{\text{к.к}}$ коллекторную область разбивают на участки простой конфигурации, для которых несложно подсчитать вносимое ими сопротивление. На рис. 12.2 представлены такие конфигурации: прямоугольные параллелепипеды (a , σ , z) с размером b в направлении, перпендикулярном плоскости

рисунка, и прямая трапециевидальная призма (б). На рисунке показаны токи, протекающие в направлениях, перпендикулярных соответствующим поверхностям, и имеющие постоянную плотность. Рассчитанное с помощью разбиения на участки простой конфигурации сопротивление $r_{к.к}$ имеет несколько завышенное значение,

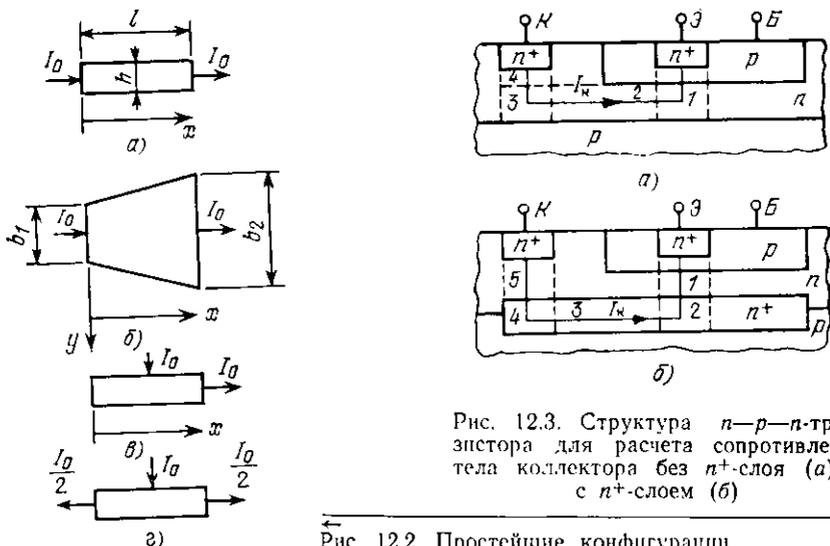


Рис. 12.3. Структура $n-p-n$ -транзистора для расчета сопротивления тела коллектора без n^+ -слоя (а) и с n^+ -слоем (б)

Рис. 12.2. Простейшие конфигурации для определения сопротивления тела коллектора

так как предполагается, что линии коллекторного тока направлены либо перпендикулярно, либо параллельно поверхности пластины в плоскости рисунка. Сопротивление конфигураций (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 как.

$$r_0 = \rho l / (hb) \quad (\text{см. рис. 12.2, а}); \quad (12.3а)$$

$$r_0 = \rho l / [h(b_2 - b_1)] \ln(b_2 / b_1) \quad (\text{см. рис. 12.2, б}), \quad (12.3б)$$

$$r_0 = \rho / (3b) [lh + h/l] \quad (\text{см. рис. 12.2, в}); \quad (12.3в)$$

$$r_0 = \rho / (6b) [l/(2h) + 2h/l] \quad (\text{см. рис. 12.2, г}), \quad (12.3г)$$

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: $l = z = b =$

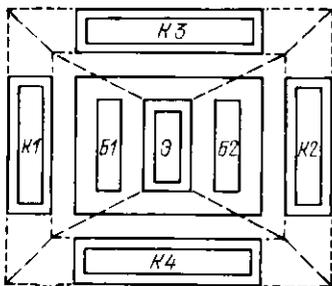
$m=c=g=d=4$ мкм; $h=q=12$ мкм; $\Delta d'=0$; $\Delta d_{0n}=3$ мкм; $\rho_k=0,5$ Ом·см; толщина скрытого n^+ -слоя 5 мкм; удельное сопротивление скрытого n^+ -слоя $R_n=10$ Ом/□ (см. § 11.4); глубины залегания эмиттерного и коллекторного переходов равны 2 и 3 мкм соответственно. Будем считать боковые стенки диффузионных областей вертикальными.

Скрытый n^+ -слой отсутствует. Разобьем область прохождения коллекторного тока на четыре участка ($I-4$ на рис. 12.3,а). Сопротивление $r_{k,k}=r_{01}+r_{02}+r_{03}+r_{04}$. Первый участок [см. (12.3в)] имеет $r_{01}=590$ Ом; второй [см. (12.3б) и штриховые линии рис. 12.1,а] — $r_{02}=1700$ Ом; третий [см. (12.3в)] $r_{03}=350$ Ом; четвертый [см. (12.3а)] $r_{04}=20$ Ом. Сопротивление $r_{k,k} \approx 2,7$ кОм.

Имеется скрытый n^+ -слой. Разобьем область прохождения коллекторного тока на пять участков ($I-5$ на рис. 12.3,б). 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 $r_{k,k} \approx 175$ Ом.

Из примера следует, что использование скрытого n^+ -слоя позволило уменьшить сопротивление тела коллектора в 15 раз.

Даже при использовании скрытого n^+ -слоя $r_{k,k} \geq 100$ Ом (для транзистора с минимальными размерами, см. табл. II. 1). Для его уменьшения, как видно из рис. 12.4, контакт к коллектору можно осуществить не только с одной из боковых сторон, но и с обеих противоположных сторон коллекторного перехода, полностью охватывать его (штриховые линии) или иметь Г- или П-образную форму. Минимальное значение $r_{k,k}$ имеет транзистор с контактом к коллектору, полностью охватывающим его. При этом его сопротивление $r_{k,k}$ приблизительно в 4 раза меньше, чем для структуры на рис. 12.1. В основном значения $r_{k,k}$ определяются областями,



находящимися вне скрытого n^+ -слоя (см. пример этого пункта). Их сопротивление определяется соотношениями (12.3а, б) при трапецидальном разбесии скрытого n^+ -слоя, показанном на рис. 12.4 штриховыми линиями.

Рис. 12.4. Топология $p-n-p$ -транзистора с уменьшенными сопротивлениями базовой области и тела коллектора

12.1.3. 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 один механизм пробоя между коллектором и эмиттером. Он связан с увеличением α благодаря лавинному умножению носителей в коллекторном переходе и уменьшению толщины базовой области при увеличении закрывающего напряжения смещения на коллекторном переходе. В транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ), при $\alpha=1$, т. е. при $V=\infty$, происходит пробой. Напряжение пробоя

$$U_B = U_{пр,к} \sqrt[1]{1 + B}, \quad (12.4)$$

где $U_{пр.к}$ — напряженне пробоя коллекторного перехода; $n=5$ для базовой n -области и $n=3$ для p -области.

Пример. Рассчитать напряжение пробоя U_B транзистора с параметрами: $\omega_0=0,7$ мкм; $U_{пр.к}\approx 40$ В и $B\approx 300$ (см. пример п. 12.3.1).

Из выражения (12.4) при $n=3$ получим $U_B=6$ В, т. е. по сравнению с напряжением $U_{пр.к}$ напряжение пробоя коллектор-эмиттер приблизительно в 7 раз меньше.

12.1.4. Частотные характеристики. Частотные характеристики интегрального транзистора отличаются от частотных характеристик дискретного тем, что изменяется вклад структурных областей в эти характеристики. Частотная характеристика коэффициента передачи эмиттерного тока

$$\alpha(\omega) = \alpha_0 \exp(-i m \omega / \omega_\alpha) / (1 + i \omega / \omega_\alpha)^{-1}, \quad (12.5)$$

где ω_α — граничная частота, при которой $|\alpha(\omega)| = 0,7\alpha_0$; m определяет дополнительный фазовый сдвиг при $\omega = \omega_\alpha$; $i = \sqrt{-1}$. Постоянная времени коэффициента α приблизительно может быть представлена как

$$\tau_\alpha = 1/\omega_\alpha = \tau_\alpha + \tau_{пр} + \tau_{о.с} + \tau_k, \quad (12.6)$$

где τ_α — постоянная времени эмиттерного перехода; $\tau_{пр}$ — постоянная времени пролета носителей через базовую область; $\tau_{о.с}$ — постоянная времени, определяющая пролет носителей через обедненный слой; τ_k — постоянная времени коллекторного перехода. Эти величины определяются как

$$\tau_\alpha = r_\alpha C_\alpha = (\varphi_T / I_\alpha) C_\alpha, \quad (12.7a)$$

где C_α — барьерная емкость; r_α — дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода;

$$\tau_{пр} = \frac{1}{D_n} \int_0^w \left(\frac{1}{N} \int_{x'}^w N dx' \right) dx', \quad (12.7b)$$

где D_n — средний коэффициент диффузии неосновных носителей; N — результирующая концентрация примесей в базовой области (см. рис. 10.2).

Время пролета носителей через обедненный слой коллекторного перехода со скоростью $v_{о.с}$ $t_{о.с} = \Delta d_k / v_{о.с}$ ($v_{о.с} \approx 10^7$ см/с), а соответствующая постоянная времени

$$\tau_{о.с} = \Delta d_k / 2v_{о.с}, \quad \tau_k = r_{к.к} (C_k + C_{из}), \quad (12.7в); (12.7г)$$

где $r_{к.к}$ — 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 транзистора *).

*) Обычно в интегральных транзисторах $\tau_{о.с}$ 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 $\tau_\alpha \approx \tau_s$ и ω_α прямо пропорционально I_s . При достаточно большом значении I_s получается $\tau_\alpha = \tau_{пр} + \tau_{о.с} + \tau_k = \text{const}$. Однако при дальнейшем увеличении тока I_s 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 $\tau_\alpha \approx \tau_k$:

$$f_\alpha = (2\pi\tau_\alpha)^{-1}. \quad (12.9)$$

Для приближенных оценок барьерных емкостей переходов, а следовательно, и быстродействия можно использовать табл. 12.1,

Таблица 12.1. Электрические параметры $p-n$ -переходов

Переход	Удельное сопротивление области коллектора, Ом·см					
	0,1		0,5		1,2	
	C_0 , пФ/мм ²	$U_{пр}$, В	C_0 , пФ/мм ²	$U_{пр}$, В	C_0 , пФ/мм ²	$U_{пр}$, 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

построенную для $R_{s3} = 2 \div 3$ Ом/□; $R_{s6} = 200$ Ом/□; сопротивления пластины p -типа $\rho_p = 10$ Ом·см; $d_s = 2,3$ мкм; $d_k = 2,7$ мкм и толщины эпитаксиальной пленки $d_{эп} = 12,5$ мкм. Эту таблицу можно использовать и при параметрах структуры ИС, отличных от указанных.

Пример. Рассчитать значения τ_α и f_α для транзистора со структурой, показанной на рис. 12.1, при напряжении коллектор—база $U_{к.б} = -1$ В и с размерами, приведенными в примере п. 12.1.2. Примем $d_{эп} = 10$ мкм; $a = 18$ мкм; $r_{к.к} = 100$ Ом; $I_k = I_s = 1$ мА и $r_s = 26$ Ом; $D_n = 18,2$ см²/с (см. пример § 11.5); $v_{о.с} = 10^7$ см/с; $\rho_k = 0,5$ Ом·см; $\omega_0 = 0,7$ мкм; $d_s = 1,7$ мкм; $\Delta d_{эп} = 0$. Воспользуемся данными примерами п. 11.4.2. Исходя из заданных геометрических размеров структуры и данных табл. 12.1 примем $C_s = 0,15$ пФ; $C_k = 0,24$ пФ и $C_{н.з} = 1$ пФ.

Из выражения (12.7а) имеем $\tau_0 = 4$ пс. Из табл. 11.2 при $U_{к,б} = -1$ В получим $\Delta d_{np} = 0,23$ мкм и $\Delta d_{к,н} = 0,43$ мкм. Тогда $w \approx 0,47$ мкм. Из соотношения (12.8) $\tau_{np} \approx 61$ пс. Из выражения (12.7в) $\tau_{0,с} \approx 3$ пс, а из (12.7г) $\tau_{н} = 124$ пс. Из соотношений (12.6) и (12.9) $\tau_{\alpha} \approx 0,19$ пс и $f_{\alpha} \approx 850$ МГц.

§ 12.2. Проектирование $n-p-n$ -транзисторов

Выбор геометрических размеров транзистора, 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.

12.2.1. Расчетные соотношения для определения геометрических размеров эмиттерной области. Модуляция проводимости базовой области транзистора приводит к изменению коэффициента передачи и сопротивления базовой области. 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. 10.2) — концентрация неосновных и равновесная концентрация основных носителей на границе обедненного слоя эмиттерного перехода в базовой области.

Коэффициент усиления тока

$$B = \alpha / (1 - \alpha) \quad (12.11)$$

достигает максимального значения при

$$\delta \approx 1. \quad (12.12)$$

Если $\delta \gg 1$ (высокий уровень инжекции), B уменьшается. Выполнение условия (12.12) при максимальном рабочем эмиттерном токе I_3 обеспечивает работу схемы при максимальном значении B .

Наступление высокого уровня инжекции происходит либо по всей донной части эмиттерного перехода, либо инициируется током I_6 , протекающим через базовую область (см. рис. 10.1) и создающим добавочное смещение на эмиттерном переходе (поверхность эмиттерного перехода перестает быть эквипотенциальной). Последнее вызывает изменение плотности эмиттерного тока в донной части эмиттера, т. е. зависимость $j_3(y)$ (рис. 12.5). Это явление называется *эффектом оттеснения эмиттерного тока*. Максимальная плотность тока при $y=0$, а минимальная — при $y=L$. Этот эффект будет существенным, если

$$I_6 r_6 \geq \Phi_T, \quad (12.13a)$$

где r_6 — сопротивление базовой области:

$$r_6 \approx L / (\sigma_6 w h) = \rho_6 L / (w h). \quad (12.13b)$$

Здесь h — ширина донной части эмиттерных областей (в направлении, перпендикулярном плоскости на рис. 10.1).

С учетом условий (12.12) и (12.13а) выражения для определения максимального удельного тока (на единицу ширины h эмиттера) имеют вид

$$\frac{I_{э,пв}}{h} = \begin{cases} \varphi_T L / (\rho_0 \omega) & \text{при } \Psi \geq 1; \\ (\varphi_T / \rho_0) (2B'_{\max})^{1/2} & \text{при } \Psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.14а)$$

где $I_{э,пв}$ — величина эмиттерного тока, превышение которой вызывает переход к высокому уровню инжекции; $B'_{\max} = 1/(1-\alpha)$ — максимальное значение коэффициента усиления тока^{*)}, при котором выполняется условие (12.12):

$$\Psi = (\omega/L) (2B'_{\max})^{1/2}. \quad (12.14в)$$

При $\Psi < 1$ спад B с увеличением эмиттерного тока происходит из-за перехода к высокому уровню инжекции, вызванному действием эффекта оттеснения, а при $\Psi > 1$ — перехода к высокому уровню инжекции без действия эффекта оттеснения. Как видно из рис. 10.1 и 12.5, при $\Psi < 1$ рабочей или «активной» является правая часть эмиттера, ближайшая к базовому контакту.

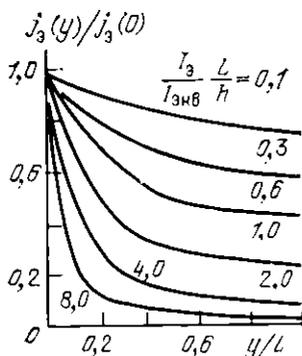


Рис. 12.5.

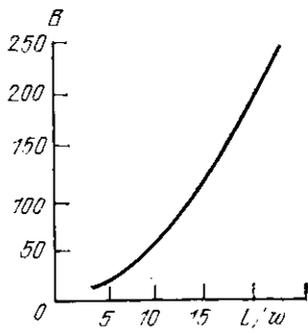


Рис. 12.6.

Рис. 12.5. Зависимости отношения $j_3(y)/j_3(0)$ от структурных параметров транзистора $\{I_{эпв} = 2\varphi_T \omega / [\rho_0(1-\alpha)]\}$

Рис. 12.6. Кривая, определяющая механизм наступления высокого уровня инжекции

На рис. 12.6 представлена зависимость B от L/ω , 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 B'_{\max} .

^{*)} При $\alpha \approx 1$ значение $B'_{\max} = B_{\max}$.

Зависимость коэффициента усиления от тока I_k (или I_a) в рабочей области имеет сложную аналитическую форму. Ее можно аппроксимировать следующей зависимостью:

$$B \approx (K_1 + K_2 I_k^{-1/2} + K_3 I_k)^{-1}, \quad (12.15)$$

где K_1 , K_2 и K_3 — постоянные, обычно определяемые из экспериментальных данных. Максимальное значение B_{\max} соответствует $I_k = (K_2/2K_3)^{2/3}$. Если допустимая величина $B < B_{\max}$ при максимальном рабочем токе, т. е. возможно $\delta > 1$, то можно использовать меньшие размеры эмиттерных областей. Соответствующая оценка уменьшения B может быть произведена с помощью (12.15).

Пример. Рассчитать ширину эмиттера транзистора (см. рис. 12.1), работающего при максимальном токе $I_b = 4$ мА и при $B_{\max} = 70$; $\omega = 0,7$ мкм; $L = 12$ мкм; $\rho_b = 0,2$ Ом·см.

Из рис. 12.6 видно, что при $L/\omega = 17$ необходимо использовать соотношение (12.14б), откуда $I_{b, \text{нб}}/h = 0,154$ мА/мкм. Для заданного I_b получим $h \approx 26$ мкм.

12.2.2. 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.

Для маломощных транзисторов ($I_k \leq 1$ мА) с высоким быстродействием необходимо минимизировать их геометрические размеры 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 h будет в два раза меньше (при одинаковых I_k)*, т. е. будет в два раза меньше площадь эмиттера. В мощных транзисторах (I_k — десятки миллиампер) для минимизации занимаемой ими площади особое значение имеет получение максимального отношения «активной» части периметра эмиттеров к площади эмиттеров. Поэтому мощные транзисторы имеют полосковую структуру, состоящую из нескольких эмиттеров и базовых контактов, соединенных параллельно (рис. 12.7).

В эмиттерах, имеющих большую ширину h , необходимо оценить падение напряжения на его контактной площадке. Оно не должно

* Если справедливо соотношение (12.14а), то в нем независимо от числа базовых контактов фигурирует полная длина эмиттера L .

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 B , f_α). Поэтому иногда бывает целесообразным разбить эмиттер на части, как показано на рис. 12.7.

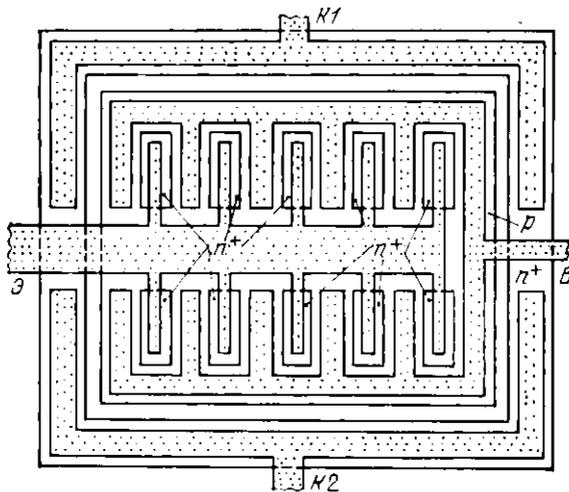


Рис. 12.7. Топология мощного биполярного $n-p-n$ -транзистора

Пример. Рассчитать ширину эмиттера транзистора со структурой рис. 12.4 при $\Psi=1$; $w=0,7$ мкм; $L=12$ мкм; $\rho_b=0,2$ Ом·см. Транзистор работает при максимальном токе 3 мА.

Из соотношения (12.14в), подставляя вместо L значение $L/2$, получаем $B=37$ при $\Psi=1$. Из выражения (12.14а) имеем $I_{э.пв}/h=0,22$ мА/мкм [в (12.14а) подставлялось значение L]. Тогда ширина эмиттера $h \approx 14$ мкм. Из соотношения (12.14б) получим $I_{э.пв}/h=0,11$ мА/мкм. С учетом того, что «активными» являются обе стороны эмиттера (ближайшие к базовым контактам), получим $h \approx 14$ мкм. Как и следовало ожидать, при $\Psi=1$ формулы (12.14а, б) дают одинаковый результат. Для структуры с одним базовым контактом (см. рис. 12.1) при $L=12$ мкм значение $\Psi=0,5$, поэтому для нее выбирается ширина эмиттера $h \approx 28$ мкм.

12.2.3. 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 сопротивления $r_{к.к.}$, r_b зависит от эмиттерного тока или от уровня инжекции. Последний модулирует проводимость части базовой области, находящейся под основанием эмиттера (r_{b1}^*) (см. рис. 12.2, в). Уравнение для определения сопротивления этого участка базовой области транзистора с конфигурацией, показанной на рис. 10.1, в зависимости от эмиттерного тока имеет вид

* При определении r_{b1} в выражениях (12.3в), (12.3г) следует опустить правое слагаемое в скобках.

$$r_{61} = \frac{\rho_6}{hb \operatorname{tg}^2 z} \int_0^L \operatorname{tg}^2 \left[z \left(1 - \frac{y}{L} \right) \right] dy,$$

где $z \operatorname{tg} z = I_3 L / (I_{3\text{кв}} h)$ и некоторый эквивалентный ток $I_{\text{экв}} = 2\varphi_T w / [\rho_6 (1 - \alpha)]$. Произведя интегрирование, получим

$$r_{61} = r_0 (\operatorname{tg} z - z) / (z \operatorname{tg}^2 z), \quad (12.16a)$$

где $r_0 = \rho_6 L / (hw)$ — сопротивление базовой области под донной частью эмиттера. При $z \rightarrow 0$, т. е. при токе $I_3 \rightarrow 0$, выражение (12.16a) имеет вид

$$r_{61} = r_0 / 3. \quad (12.166)$$

Из сравнения (12.3в) и (12.16б) видно, что, как и следовало ожидать, выражения для определения сопротивления областей совпадают.

На рис. 12.8 показана зависимость нормированного сопротивления r_{61} от структурных и электрических характеристик. При заданных параметрах транзисторной структуры с помощью этой зависимости можно определить сопротивление части базовой области r_{61} . Учет сопротивления периферийных участков базовой области (r_{62}) с помощью соотношений (12.3) позволяет найти $r_6 = r_{61} + r_{62}$. Для структуры транзистора с двумя базовыми контактами соотношение (12.16a) по аналогии с (12.3в, г) запишем как

$$r_{61} = r_0 (\operatorname{tg} z - z) / (4z \operatorname{tg}^2 z). \quad (12.17)$$

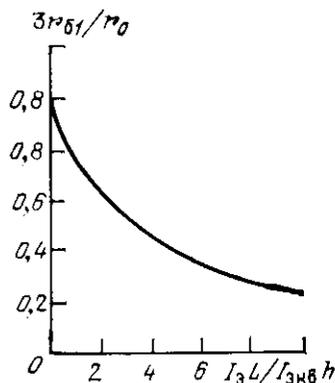


Рис. 12.8. Зависимость нормированного сопротивления базовой области n - p - n -транзистора от параметров транзисторной структуры

Как видно из рис. 12.1, 12.4 и выражений (12.16a), (12.17), использование транзистора с двумя базовыми контактами позволяет в 2—4 раза уменьшить r_6 по сравнению с сопротивлением в структуре с одним базовым контактом. Для уменьшения r_6 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: $B=70$; $\Delta d_{np}=0$; $\Delta d_{np}=0,3$ мкм; $f=z-d-b=n=c=g=4$ мкм; $h=g=12$ мкм; $d_s=1$ мкм; $d_k=2$ мкм; удельное сопротивление слоя базы $R_s=200$ Ом/□; $\rho_6=0,2$ Ом·см; диапазон изменения токов $0 \leq I_3 \leq I_{3\text{max}}$.

В структуре с одним базовым контактом разобьем область базы на три участка: прямоугольная призма под основанием эмиттера $r_{01}=r_{61}$ (12.3в); трапециевидная призма [(12.3б) и штрих-пунктир на рис. 12.1, б] и прямоугольная призма под базовым контактом r_{03} (12.3в) ($r_{62}=r_{02}+r_{03}$). Сопротивление $r_{01} \approx 950$ Ом. Для определения сопротивлений r_{02} и r_{03} используем значение ρ , усредненное по базовому диффузионному слою: $\rho = R_s d_k = 0,04$ Ом·см. Значения

$r_{02} \approx 510$ Ом и $r_{03} \approx 30$ Ом. Суммарное сопротивление $r_6 \approx 1500$ Ом при $I_3 \ll I_{3 \max}$. Значение тока $I_{3 \max}$ получим из примера п. 12.2.1 при $L = h = 12$ мкм: $I_{3 \max} \approx 1,8$ мА. Для нахождения сопротивления r_6 при токе $I_3 \max$ воспользуемся рис. 12.8. Значение $I_3 L / (I_{3 \max} h) = 1,4$, а $r_{01} \approx 660$ Ом. Тогда $r_6 = 1200$ Ом. Для структуры с двумя базовыми контактами $r_6 = [r_{01} + 2(r_{02} + r_{03})] / 4$. При $I_3 \ll I_{3 \max}$ значение $r_6 \approx 510$ Ом, а при $I_3 = I_{3 \max}$ сопротивление $r_6 \approx 430$ Ом.

§ 12.3. Расчет коэффициента передачи n — p — n -транзистора

Статический коэффициент передачи эмиттерного тока α и коэффициент усиления B являются одними из основных параметров транзистора. Они определяют не только схемные, но и структурные особенности транзистора (см. п. 12.2.1). Коэффициент

$$\alpha = \gamma \kappa, \quad (12.18)$$

где γ — коэффициент инжекции эмиттерного p — n -перехода; κ — коэффициент переноса.

Обычно

$$TK B = (1/B) \partial B / \partial T = 0,5\% / ^\circ C.$$

12.3.1. Статистический коэффициент передачи при нормальном включении. Коэффициент переноса определяется известным соотношением

$$\kappa = \tau_n / (\tau_n + \tau_{np}), \quad (12.19a)$$

где τ_n — среднее время жизни неосновных носителей в базовой области; τ_{np} — время пролета носителей через последнюю. С учетом $\tau_n \gg \tau_{np}$ выражение (12.19a) преобразуется:

$$\kappa \approx 1 - \tau_{np} / \tau_n. \quad (12.19b)$$

Величина τ_{np} находится из (12.8). Выражение для определения коэффициента инжекции запишем в виде

$$\gamma \approx 1 - D_p N_T / (D_n N_3), \quad (12.20)$$

где D_p — средний коэффициент диффузии дырок в эмиттере; N_T — удельное количество донорной примеси в эмиттере. В выражении (12.20) с учетом эффектов, связанных с сильным легированием эмиттера, величину N_3 следует заменить на эффективную:

$$N_{3, \text{эф}} = \int_0^{d_a - \Delta d_{3n}} N_{3 \text{эф}} dx, \quad (12.21)$$

где $N_{3 \text{эф}}$ — эффективная концентрация донорной примеси в эмиттере. Получение точных аналитических выражений, определяющих величину $N_{3, \text{эф}}$, затруднено. Поэтому для оценочных расчетов значения γ будем использовать кусочно-линейную аппроксимацию $N_{3 \text{эф}}$, представленную на рис. 12.9. На рисунке приняты следующие обозначения: $N_{3 \text{эф} \max}$ и $N_{д \max}$ — максимальное значение эффективной концентрации и соответствующее истинное значение концентрации; $N_{3 \text{эф} \text{сп}}$ и $N_{д \text{сп}}$ — значение эффективной концентрации, соответствующей спадающей части аппроксимирующей зависимости,

и истинное значение концентрации; d_{\max} и $d_{\text{сп}}$ — координаты, соответствующие концентрациям $N_{d \max}$ и $N_{d \text{сп}}$. Значения концентраций *) $N_{d \max} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $N_{\text{эф} \max} = (1-2) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{d \text{сп}} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $N_{\text{эф} \text{сп}} = (2,5-4,0) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Аппроксимирующую зависимость можно представить как

$$N_{\text{эф}}(x) = \begin{cases} \frac{(N_{\text{эф} \max} - N_{\text{эф} \text{сп}})x + N_{\text{эф} \text{сп}}d_{\max} - N_{\text{эф} \max}d_{\text{сп}}}{d_{\max} - d_{\text{сп}}} & \text{при } x < d_{\max}; \\ \frac{N_{\text{эф} \max}}{d_3 - d_{\max}}(d_3 - x) & \text{при } x \geq d_{\max}. \end{cases} \quad (12.22)$$

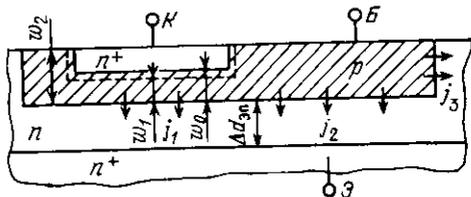
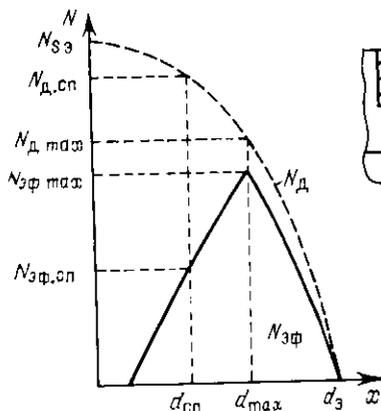


Рис. 12.10. Структура $n-p-n$ -транзистора для расчета инверсного коэффициента передачи

Рис. 12.9. Аппроксимация эффективной концентрации донорной примеси в эмиттере $n-p-n$ -транзистора

Формулы для определения d_{\max} и $d_{\text{сп}}$ с учетом (10.16) запишем в виде

$$d_{\max, \text{сп}} = d_{0\text{э}} \sqrt{\ln(N_{\text{сэ}}/N_{d \max, d \text{сп}})}. \quad (12.23)$$

Если $N_{\text{сэ}} \leq 10^{20} \text{ см}^{-3}$, то на участке $0 \leq x \leq d_{\max}$ значение $N_{\text{эф}} = N_{\text{эф} \max}$. Подставляя соотношение (12.22) в (12.21) и считая, что $\Delta d_{\text{эп}} = 0$, получим

$$N_{\text{э}} = 0,5 \{ [(d_{\max} - d_{\text{гр}})/(d_{\max} - d_{\text{сп}})] | N_{\text{эф} \max} (d_{\max} + d_{\text{гр}} - 2d_{\text{сп}}) + N_{\text{эф} \text{сп}} (d_{\max} - d_{\text{гр}}) | + N_{\text{эф} \max} (d_3 - d_{\max}) \}, \quad (12.24)$$

где значение $d_{\text{гр}}$ соответствует координате x , при которой $N_{\text{эф}}(d_{\text{гр}}) = 0$.

Из анализа зависимостей (12.20), (12.24) от концентрации $N_{\text{сэ}}$ следует, что значение γ достигает максимума при $N_{\text{сэ}} = (1-8) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Пример. Рассчитать значение коэффициента усиления B транзистора с электрофизическими параметрами областей, данными в § 10.3, при $U_{\text{кб}} = -1 \text{ В}$.

Примем $N_{\text{эф} \text{сп}} = 3,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $N_{\text{эф} \max} = 1,7 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; $N_{d \max} = 10^{19} \text{ см}^{-3}$; $N_{d \text{сп}} = 10^{20} \text{ см}^{-3}$; $D_p = 1 \text{ см}^2/\text{с}$ и $Ad_3 = 0$. Используем данные примеров § 11.5

*) Указанные значения приведены для донорной примеси — фосфора.

и п. 12.1.4. Из формулы (12.24) $N_a = 0,87 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, а из (11.15) $\Lambda_T = 2,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Из соотношения (12.20) $\gamma = 0,99866$. Из формулы (12.196) при $\tau_{np} \approx 61 \text{ пс}$ и $\tau_n = 30 \text{ нс}$ $\kappa = 0,99797$. Соответствующее значение $\bar{V} \approx 300$.

12.3.2. Коэффициент передачи при инверсном включении. Воспользуемся рис. 12.10, на котором j_1, j_2, j_3 — плотности эмиттерного тока на соответствующих участках*). Будем считать, что распределение примесей в базовой области описывается экспоненциальной функцией (10.3) с характеристической постоянной диффузионного процесса

$$d_{0\sigma} = d_{\sigma} / \ln(N_{s\sigma} / N_R); \quad (12.25)$$

$n-n^+$ -переход полупроводниковой пластины «отражающий» для неосновных носителей (см. § 11.5); скорость поверхностной рекомбинации носителей на границах полупроводник — металл и полупроводник — оксид равна бесконечности; $p-n$ -переходы имеют прямоугольную форму.

Считая, что транзистор работает в активном режиме, плотности токов можно представить так:

$$j_{n1,2} = q D_n n_p^r(0) \{d_{0\sigma} [\exp(\omega_{1,2} / d_{0\sigma}) - 1]\}^{-1}; \quad (12.26a)$$

$$j_{p1} = j_{p2} = [q D_p p_n(0) / L_p] \text{th}(\Delta d_{\sigma n} / L_p); \quad (12.26б)$$

$$j_{p3} = q D_p p_n(0) / L_p, \quad (12.26в)$$

где $n_p(0)$ и $p_n(0)$ — концентрации неосновных носителей на границах слоя пространственного заряда эмиттерного перехода. Как показывает анализ, между плотностями электронного тока на соответствующих участках (см. рис. 12.10) существует соотношение

$$j_{n1} > j_{n2} \gg j_{n3}. \quad (12.27)$$

Поэтому при расчете коэффициента передачи тока α_I плотность тока j_{n3} не учитывается.

Величина α_I обычно не превышает 0,8—0,9 и при узкой базе (ω_1) можно считать $\kappa \approx 1$. Тогда

$$\alpha_I^{-1} \approx 1 + [(K_1 - 1) j_{n2} + K_1 j_{p1} + K_2 j_{p3}] / j_{n1}, \quad (12.28a)$$

а с учетом соотношений (12.26)

$$\alpha_I^{-1} = 1 + \left(\exp \frac{\omega_1}{d_{0\sigma}} - 1 \right) \left[\frac{K_1 - 1}{\exp(\omega_2 / d_{0\sigma}) - 1} + \frac{D_p d_{0\sigma}}{L_p D_n} \left(K_2 + K_1 \text{th} \frac{\Delta d_{\sigma n}}{L_p} \right) \right], \quad (12.28б)$$

где K_1 и K_2 — отношения донной и боковой площадей эмиттерного перехода к площади донной части коллекторного перехода. Из анализа выражений (12.28) следует, что α_I возрастает при увеличении глубины залегания эмиттерного перехода и концентрации примесей в эмиттерной области, а также при уменьшении толщины

*) При инверсном включении эмиттерным является коллекторный переход (ср. с рис. 10.1).

базы транзистора, поверхностной концентрации примесей базовой диффузии, толщины эпитаксиальной пленки n -типа и величин K_1 и K_2 .

Пример. Рассчитать значения инверсного коэффициента усиления 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; $\Delta d_{эп}/L_p = \infty$; 2) $\omega_1=0,4; 0,6$ мкм; $\omega_2=2,0$ мкм; $\Delta d_{эп}=1-9$ мкм. Используем данные примеров § 11.5 и п. 12.1.2.

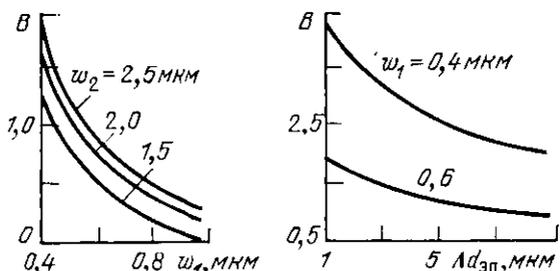


Рис. 12.11. Зависимости инверсного коэффициента усиления $n-p-n$ -транзистора от параметров

Расчетные значения K_2 и $d_{об}$ по формуле (12.25) представлены в табл. 12.2. Из исходных данных, выражения (12.11) и соотношения (12.286) получены значения B_I , представленные на рис. 12.11. При $\omega_1=0,4$ мкм и $\omega_2=2,0$ мкм из (12.26а) отношение $j_{n1}/j_{n2} \approx 80$, что подтверждает неравенство (12.27).

Постоянная времени коэффициента передачи при инверсном включении

$$\tau_\alpha = \alpha_I [\exp(\omega_1/d_{об}) - 1] [(K_1 - 1) d_{об} + K_1 \Delta d_{эп}] d_{об}/D_n. \quad (12.29)$$

Формула (12.29) верна для наиболее часто встречающегося случая

$$\Delta d_{эп}/L_p(\omega) \leq 0,75, \quad (12.30)$$

где $L_p(\omega) = L_{p0}/\sqrt{1+i\omega\tau_p}$, а L_{p0} — диффузионная длина дырок при $\omega=0$ и $i = \sqrt{-1}$. Из соотношения (12.29) видно, что динамические характеристики коэффициента передачи α_I улучшаются при уменьшении значений $\Delta d_{эп}$, 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 через обедненный слой коллекторного перехода (12.6), можно не учитывать. Кроме того, в соотношении (12.5) можно считать $m=0$.

Таблица 12.2. Параметры $n-p-n$ -транзистора

ω_2 , мкм	1,5	2,0	2,5
K_2	2,5	3,3	4,1
$d_{об}$, мкм	0,24	0,32	0,40

Пример. Рассчитать значения постоянной времени τ_α и граничной частоты f_α транзистора при инверсном включении с электрофизическими характеристиками

ками областей, его образующих, данными в § 10.3, при $K_1=10$; $\Delta d_{np}=3$ мкм; $\omega_1=0,6$ мкм; $\omega_2=2$ мкм. Используем данные примеров § 11.5 и п. 12.1.2.

Из (12.29) $\tau_\alpha \approx 18$ нс. Проверка подтверждает выполнение неравенства (12.30). Из (12.9) получим $f_\alpha \approx 9$ МГц. Сравнение данных этого примера и примера п. 12.1.4 ($f_\alpha \approx 850$ МГц) подтверждает существенное ухудшение динамических характеристик при изменении режима работы транзистора.

§ 12.4. Проектирование $p-n-p$ -транзисторов

В настоящее время в ИС получили распространение два типа $p-n-p$ -транзисторов: вертикальный, использующий в качестве коллектора дошную 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 ИС и формируются одновременно с $n-p-n$ -транзисторами.

12.4.1. Вертикальный $p-n-p$ -транзистор. На рис. 12.12 показана структура вертикального $p-n-p$ -транзистора, имеющего ту же структуру, что и «паразитный» транзистор (см. п. 12.1.1).

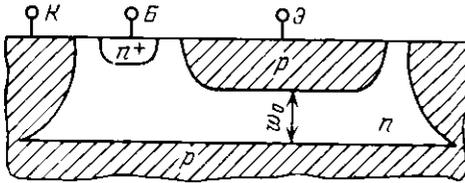


Рис. 12.12. Структура «паразитного» $p-n-p$ -транзистора

Расчет коэффициента передачи тока в таком транзисторе весьма прост, так как его базовая область легирована однородно. Коэффициент B у этого транзистора на один-два порядка меньше, чем у $n-p-n$ -транзистора, поэто-

му величина α определяется коэффициентом переноса κ . Полагая $\gamma=1$ и используя известное выражение для коэффициента передачи, получаем

$$\alpha \approx \kappa - \operatorname{sch}(\omega/L_p) \quad (12.31a)$$

и при $\omega/L_p \ll 1$

$$\alpha \approx 1 - 0,5(\omega/L_p)^2. \quad (12.31b)$$

Определение геометрических размеров, расчет сопротивлений базовой области, тела коллектора и быстродействия транзисторов проводится аналогично нахождению этих параметров у $n-p-n$ -транзистора.

Транзисторы этого типа при $\omega_0=3-10$ мкм имеют $B=3 \div 30$; $f_\alpha=3 \div 40$ МГц; ТК $B=0,3 \div 0,5\%$ /°С.

Пример. Рассчитать коэффициент усиления вертикального $p-n-p$ -транзистора, частоту f_α и геометрические размеры эмиттерной области при $\omega_0=5$ мкм; $\rho_0=0,5$ Ом·см, $D_p=10,4$ см²/с и $L_p=10,2$ мкм (см. пример § 11.5); $I_b=1$ мА при длине окна под эмиттерную область $L=12$ мкм.

Примем $\omega=\omega_0$. Тогда $\alpha \approx 0,89$ (12.31a) и $B \approx 8$. Из выражений (12.8) и (12.9), полагая $\tau_\alpha \approx t_d$, получаем $f_\alpha \approx 13$ МГц. Для расчета ширины эмиттерной области b рассмотрим конфигурацию с одним базовым контактом (см. рис.

12.12). Тогда [см. (12.14)] при $V_{max} = 9$ $\Psi = 1,8 > 1$, а $I_{b, min} = 0,0125$ мА/мкм и $h \approx 80$ мкм. Использование конфигурации транзистора с двумя контактами к базовой области не приведет к сокращению ширины эмиттера (см. п. 12.2.2).

12.4.2. 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_b), рекомбинируют в объеме полупроводника. Для удобства расчета электрических параметров обычно заменяют боковые участки эмиттерного перехода прямыми линиями и полагают $L_1 = L'_1 + 2d_n \cos(\pi/4) \approx L'_1 + 1,4d_n$; $L_2 = L'_2 + 1,4d_n$; $\omega = \omega' - 1,4d_n$. Значения L'_1 , L'_2 и ω' берутся по фотошаблону, а d_n — глубина залегания эмиттерного и коллекторного переходов.

Выражение для определения коэффициента передачи тока горизонтального транзистора, в отличие от (12.18), запишется как

$$\alpha = \gamma \gamma^* \kappa, \quad (12.32a)$$

где γ^* — эффективный коэффициент инжекции, определяющий долю дырочного тока эмиттерного перехода, протекающего в горизонтальном направлении; κ — коэффициент переноса горизонтальной части эмиттерного тока. Считая $\gamma = 1$ (см. п. 12.4.1), получаем

$$\alpha \approx \gamma^* \kappa, \quad (12.32b)$$

а

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + A_d j_b (A_b j_r)^{-1}, \quad (12.33)$$

где A_d , A_b — площади донной и боковой частей эмиттерного перехода. Протекание тока $j_b A_d$ приводит к появлению «паразитного» $p-n-p$ -транзистора, показанного на рис. 12.13, а штриховой линией (T_n). Величины γ^* и κ 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 транзистор работает в активном режиме. Соотношение (12.33) примет вид: при наличии скрытого n^+ -слоя

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + (A_d/A_b) \operatorname{th}(\omega/L_p) \operatorname{th}(\Delta d'_{em}/L_p); \quad (12.34a)$$

при его отсутствии

$$(\gamma^*)^{-1} = 1 + (A_d/A_b) \operatorname{th}(\omega/L_p) \operatorname{cth}(\Delta d_{em}/L_p). \quad (12.34b)$$

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 α увеличивается при наличии скрытого n^+ -слоя и уменьшении $\Delta d'_{em}$, а также при уменьшении ширины эмиттерного перехода и увеличении глубины его залегания.

При определении геометрических размеров транзистора с использованием соотношений (12.14) следует учесть только горизон-

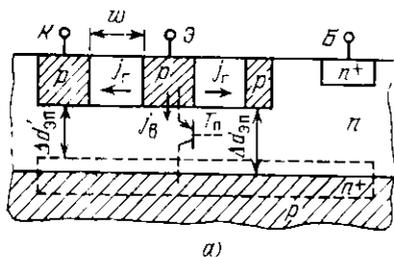
тальную составляющую эмиттерного тока. Тогда выражения (12.14) примут вид

$$\frac{I_{\text{э.шв}}}{h} = \begin{cases} \Phi_T d_n / (\rho_0 \omega \gamma^*) & \text{при } \Psi \geq 1; \\ \Phi_T / (\gamma^* \rho_0) \sqrt{2(1-\kappa)^{-1}} & \text{при } \Psi \leq 1, \end{cases} \quad (12.35a)$$

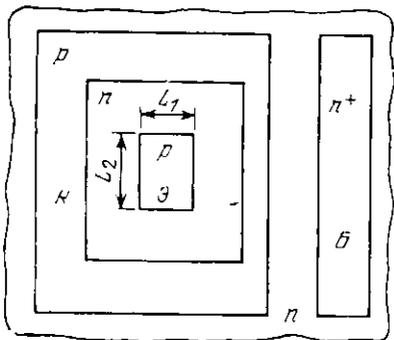
где $h = L_2$;

$$\Psi = (\omega/d_n) \sqrt{2(1-\kappa)^{-1}}. \quad (12.35b)$$

Кроме горизонтальных транзисторов с коллектором, полностью охватывающим эмиттер (см. рис. 12.13), часто используются транзисторы с разомкнутым коллектором (рис. 12.14, а). В этой конфигурации коллекторы могут быть либо объединены, либо исполь-

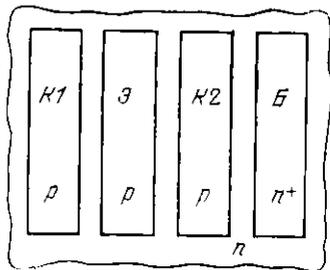


а)

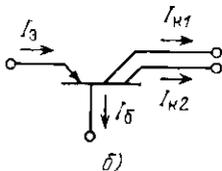


б)

Рис. 12.13.



а)



б)

Рис. 12.14.

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

зоваться отдельно. В последнем случае транзистор имеет два коллектора (рис. 12.14, б). Обычно горизонтальные транзисторы имеют $B \leq 50-100$.

Температурный коэффициент B горизонтального транзистора имеет приблизительно такую же величину, что и у вертикального $p-n-p$ -транзистора ($TK B = 0,3-0,5\%/^{\circ}C$).

Пример. Рассчитать значение коэффициента усиления горизонтального транзистора со структурой рис. 12.14, а при объединенных коллекторах и ширину эмиттера L'_2 (по фотошаблону) при $I_a=1$ мА. Примем длину эмиттера (по фотошаблону) $L'_1=12$ мкм; расстояние между эмиттером и коллектором (по фотошаблону) $w'=6$ мкм; $d_n=2,4$ мкм; $\rho_6=0,5$ Ом·см; $\Delta d'_{ан}=2,6$ мкм; $L_p=10,2$ мкм (см. пример п. 12.4.1). Имеется скрытый n^+ -слой.

Значения $w=w'-1,4d_n=2,64$ мкм; $L_1=L'_1+1,4d_n=15,36$ мкм; $A_d/A_6=1,2d_n=3,2$. Из соотношений (12.31а), (12.32б), (12.34а) получим: $\kappa=0,97$; $\gamma^*=0,83$; $\alpha=0,81$; $B=4,3$. Приняв $B_{max}=4,3$, из (12.35в) имеем $\Psi \approx 9 > 1$. Из (12.35а), учитывая наличие двух коллекторов (по каждому из коллекторов эффективный коэффициент инжекции равен $\gamma^*/2$), $I_{a,ув}/h=0,023$ мА/мкм. Тогда $L_2=h \approx 43$ мкм, а $L'_2 \approx 40$ мкм.

12.4.3. Частотные характеристики горизонтальных транзисторов. Частотные зависимости коэффициента передачи горизонтального транзистора определяются аналогично обычному $n-p-n$ -транзистору (12.6). Однако для горизонтального транзистора необходимо учесть, что заряд неосновных носителей накапливается не только в «активной» базовой области, но и под донной частью эмиттерного перехода. Для горизонтального транзистора

$$\tau_\alpha \approx Q_n/I_n, \quad (12.36)$$

где $Q_n=Q_d+Q_6$, а Q_d и Q_6 — заряды неосновных носителей, накопленные под донной 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

$$\tau_\alpha \approx \tau_p \left(\operatorname{ch} \frac{w}{L_p} - 1 \right) \left\{ 1 + \frac{A_d \operatorname{sh}(w/L_p) [\operatorname{ch}(\Delta d_{ан}/L_p) - 1]}{A_6 \operatorname{sh}(\Delta d_{ан}/L_p) [\operatorname{ch}(w/L_p) - 1]} \right\}, \quad (12.37а)$$

при наличии скрытого n^+ -слоя

$$\tau_\alpha \approx \tau_p \left(\operatorname{ch} \frac{w}{L_p} - 1 \right) \left\{ 1 + \frac{A_d \operatorname{sh}(w/L_p) \operatorname{sh}(\Delta d'_{ан}/L_p)}{A_6 \operatorname{ch}(\Delta d'_{ан}/L_p) [\operatorname{ch}(w/L_p) - 1]} \right\}. \quad (12.37б)$$

Если $w/L_p, \Delta d_{ан}/L_p \ll 1$, то уравнения (12.37) преобразуются соответственно в

$$\tau_\alpha \approx (w^2/2D_p) [1 + A_d \Delta d_{ан}/(A_6 w)]; \quad (12.38)$$

$$\tau_\alpha \approx (w^2/2D_p) [1 + 2A_d \Delta d'_{ан}/(A_6 w)]. \quad (12.39)$$

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 при его отсутствии. Обычно горизонтальные транзисторы имеют $f_\alpha \leq 50$ МГц.

Пример. Рассчитать значения τ_α и f_α горизонтального транзистора при наличии или отсутствии скрытого n^+ -слоя. Примем, что транзистор имеет параметры, данные в примерах § 11.5 и п. 12.4.2, и $\Delta d_{ан}=\Delta d'_{ан}$.

Из уравнений (12.37) $\tau_\alpha=14$ нс без n^+ -слоя и $\tau_\alpha=24$ нс с n^+ -слоем. Значения граничных частот f_α , полученные из (12.9), равны соответственно 11,4 и 6,6 МГц.

12.4.4. Многоколлекторный горизонтальный транзистор. Горизонтальный транзистор со структурой рис. 12.14, а может иметь несколько коллекторных областей, при этом упрощается топология

схемы, в которой необходимо иметь $p-n-p$ -транзисторы с объединенными эмиттерными и базовыми контактами, в частности в схемах интегральной инжекционной логики (И²Л). В ряде схем горизонтальный $p-n-p$ -транзистор должен иметь небольшой, но стабильный коэффициент усиления при разбросах технологических режимов его изготовления.

Рассмотрим структуру на рис. 12.14. Обозначим суммарный коэффициент усиления транзистора B_c при условии, что оба коллектора ($K1$ и $K2$) объединены. Коэффициент усиления транзисторов при использовании каждого коллектора в отдельности B_1, B_2 ; полагая $B_{1,2} \gg 1$ и используя (12.34), имеем при $\kappa = 1$

$$B_1 = B_c A_{61}/A_{6.c}; \quad (12.40a)$$

$$B_2 = B_c A_{62}/A_{6.c}, \quad (12.40b)$$

где A_{61}, A_{62} — площади соответствующих боковых поверхностей эмиттерного перехода; $A_{6.c} = A_{61} + A_{62}$. Соединим коллектор $K2$ с базой. В этом случае с учетом (12.40)

$$I_{к1} = I'_6 B_c A_{61}/A_{6.c}; \quad I'_6 = I_6 - I_{к2}.$$

Реальная величина коэффициента усиления

$$B_p = I_{к1}/I_6 = A_{61}(A_{6.c}/B_c + A_{62})^{-1} \quad (12.41a)$$

обладает высокой стабильностью. Полагая, что $A_{61} = nA_{62}$ (n — постоянная), из (12.41a) имеем

$$B_p = n [1 + (1 + n)/B_c]^{-1}. \quad (12.41b)$$

Пример. Рассчитать изменение значения B_p при изменении B_c в диапазоне $5 \leq B_c \leq 20$, если при $B_c = 10$ значение $B_p = 2$.

Из (12.41b)

$$n = (B_p B_c + B_p)/(B_c - B_p) = 2,75.$$

При $n = 2,75$ и $B_c = 5-20$ из (12.41b) получим $B_p = 1,6-2,3$. Это означает, что при изменении значения B_c в два раза (относительно $B_c = 10$) значение B_p меняется лишь на 20% (относительно $B_p = 2$).

§ 12.5. Проектирование интегральных диодов на основе $p-n$ -переходов

Диоды в ИС изготавливаются одновременно с другими элементами: биполярными транзисторами и пассивными элементами. Как говорилось выше, параметры диффузионных процессов и полупроводниковой пластины определяются требованиями, обеспечивающими заданные параметры биполярных транзисторов. Поэтому диоды формируются на основе уже определенных технологических режимов изготовления ИС и возможности оптимизации их параметров ограничены.

Диоды имеют температурное изменение прямого напряжения $dU_{\pi}/dT = -(1,9 \div 2,1)$ мВ/°С.

12.5.1. Структура диодов в ИС. Любой из $p-n$ -переходов, имеющих в ИС, 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 варьировать параметрами диодов. На рисунке: r_d , C_d и C_n — последовательное активное сопротивление (без учета сопротивления са-

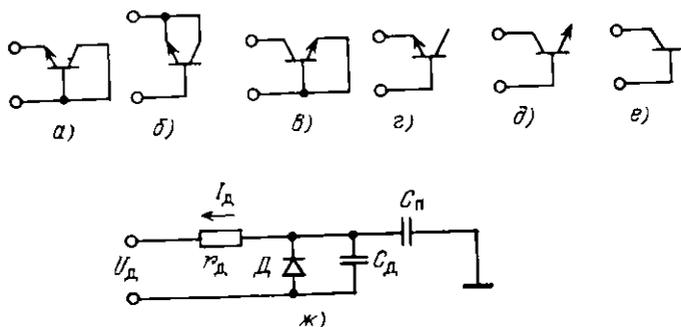


Рис. 12.15. Электрические (а—е) и эквивалентная (ж) схемы интегральных диодов

мих $p-n$ -переходов), емкость и паразитная емкость диода по отношению к источнику напряжения, фиксирующего потенциал p -области изолирующего $p-n$ -перехода^{*)}; 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, значение α_p которого предполагается близким к нулю вследствие использования скрытого n^+ -слоя.

Таблица 12.3. ВАХ интегральных диодов

Тип диода	I_d	U_d
а	$I_{s0} \exp(U_{0,6}/m_1 \Phi_T)$	$U_{0,6} + I_d r_{0,6}/B$
б*	$I_{s0} (1 - \alpha \alpha_I) \exp(U_{0,6}/m_2 \Phi_T)$	$U_{0,6} + I_K r_{0,6} + I_d r_0$
в	$I_{s0} \exp(U_{0,6}/m_2 \Phi_T)$	$U_{0,6} + (r_0/B_I + r_{0,6}) I_d$
г	$I_{s0} (1 - \alpha \alpha_I) \exp(U_{0,6}/m_1 \Phi_T)$	$U_{0,6} + r_0 I_d$
д	$I_{s0} (1 - \alpha \alpha_I) \exp(U_{0,6}/m_2 \Phi_T)$	$U_{0,6} + (r_{0,6} + r_0) I_d$
е	$I_{s0} \exp(U_{0,6}/m_2 \Phi_T)$	$U_{0,6} + I_d r_{0,6}$

* $I_{s0} = I_{s0} \exp(U_{0,6}/m_2 \Phi_T)$ $I_{s0} \exp(U_{0,6}/m_1 \Phi_T)$ и $U_{0,6} = U_{0,6} + I_K r_{0,6}$

** m_1 и m_2 — постоянные ($1 \leq m_{1,2} \leq 2$), учитывающие отличие идеальных ВАХ $p-n$ -переходов от реальных.

В табл. 12.3 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) интегральных диодов. Тип диода (а—е) соответствует рис. 12.15. Тепловые токи находятся из соотношений (11.16) — (11.18), (11.21)**). В табл. 12.4 представлены основные параметры диодов в ИС ($t_{в}$ — время восстановления обратного сопротивления

*) Часто p -подложка подключена на землю, что и показано на рис. 12.15, ж.

***) В ряде случаев определяющую роль в значении обратных токов играет ток термогенерации, не учтенный в формулах ВАХ диодов табл. 12.3.

Таблица 12.4. Основные электрические параметры интегральных диодов ИС

Тип диода	r_d	C_d	C_p	$U_{пр}$	t_v
<i>a</i>	r_6/B	C_p	$C_{пз}$	$U_{пр.в}$	1
<i>б</i>	r_6	$C_a + C_k$	$C_{пз}$	$U_{пр.в}$	30
<i>в</i>	$r_6/B_1 + r_{к.к}$	C_k	$C_{пз}$	$U_{пр.к}$	18
<i>г</i>	r_6	C_a	$C_{пз}C_k / (C_{пз} + C_k)$	$U_{пр.в}$	14
<i>д</i>	$r_{к.к} + r_6$	C_k	$C_{пз}$	$U_{пр.в}$	26
<i>е</i>	$r_{к.к}$	C_k	$C_{пз}$	$U_{пр.к}$	16

ния 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.

Пример. Рассчитать прямые ВАХ диодов, работающих в прямом направлении, со структурами рис. 12.15, *a—e* при наличии n^+ -слоя. Примем: $m_1\varphi_T = m_2\varphi_T = 30$ мВ; $\omega = 0,6$ мкм; $\Delta d_{эл} = 2,6$ мкм; $A_{э,д} = 144$ мкм² и $A_{к,д} = 720$ мкм², а их отношение $K_2 = 2,9$; $j_{э0} \approx j_{кон1} \approx 3,4 \cdot 10^{-10}$ А/см² и $j_{кон1} = j_{кон2} = 0,1 \cdot 10^{-10}$ А/см² (см. рис. 12.10 и пример § 11.5); $r_6 = 1$ кОм; $r_{к.к} = 100$ Ом. Будем считать, что диодные структуры имеют электрофизические характеристики областей, данные в § 10.3.

Вспользуемся данными примера § 11.5, рис. 12.10 и формулами (11.16), (11.18), (11.21б), (12.28а). Тогда $j_{кон2} = j_{кон3} = 0,015 \cdot 10^{-10}$ А/см²; $j_{кон3} = 0,4 \cdot 10^{-10}$ А/см², $\alpha_1 \approx 0,7$. Считая $\alpha \approx 1$ и используя табл. 12.3, получаем прямые ВАХ диодов, показанные на рис. 12.16. При построении ВАХ диода со структурой, показанной на рис. 12.15, *e* при отсутствии эмиттера, полагалось, что $j_{кон1} = j_{кон2} = j_{кон3} = 0,015 \cdot 10^{-10}$ А/см².

12.5.2. Расчет геометрических размеров диодов. При определении геометрических размеров диодов максимальный рабочий ток определяется так же, как и для биполярных транзисторов (см. п. 12.2.1).

Превышение максимального тока вызывает уменьшение крутизны ВАХ диода.

В структуре *a* выбор геометрических размеров проводится с помощью соотношений (12.14), т. е. процессы в этом диоде аналогичны процессам в обычном транзисторе (см. примеры

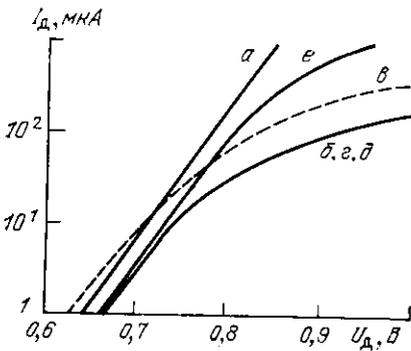


Рис. 12.16. Прямые ВАХ интегральных диодов с различной структурой

пп. 12.2.1, 12.2.2). В структуре *б* соединение в параллель эмиттерного и коллекторного переходов приводит к тому, что $I_d = I_с$, т. е. $\alpha = 0$. Поэтому в выражении (12.14) значение $B'_{max} = (1 - \alpha)^{-1}$ надо положить равной единице. В структуре *в*, работающей в инверсном по отношению к структуре *a* режиме, расчет проводится также по отношению (12.14), однако в нем необходимо заменить B'_{max} на

$$B'_{I_{max}} = (1 - \alpha_{I_{max}})^{-1}, \quad (12.42)$$

где $\alpha_{I \max}$ — максимальное значение коэффициента передачи в инверсном включении. В структурах *г* и *д* расчет проводится аналогично расчету для структуры *б*. В структуре *е* ток диода в основном дырочный, поэтому переход к высокому уровню инжекции определяется параметрами коллекторной области. Используя выражение (11.19б) при наличии скрытого n^+ -слоя, получаем максимальную плотность тока диода, соответствующую переходу к высокому уровню инжекции ($j_{д.пв}$), в виде

$$j_{д.пв} = (q D_p N_n / L_p) \operatorname{th}(\Delta d_{оп} / L_p), \quad (12.43)$$

где $\Delta d_{оп}$ — расстояние от донной части коллекторного перехода до границы скрытого n^+ -слоя.

Пример. Рассчитать площадь основания коллекторного перехода диодов со структурами *в* и *е* при максимальном токе $I_d = 1$ мА; $w = 0,6$ мкм; $\alpha_I \approx 0,7$; $\rho_n = 0,5$ Ом·см; $N_n = 10^{16}$ см $^{-3}$; $D_p = 10,4$ см 2 /с; $L_p = 10,2$ мкм; $\Delta d_{оп} = 2,6$ мкм.

Для структуры *в* из соотношений (12.14) при ширине эмиттерной области $L = 12$ мкм, наличии двух базовых контактов получим $\Psi = 0,17 < 1$. Тогда $I_{д.оп}/2h = 0,013$ мА/мкм, где h — длина области эмиттера. При $I_d = 1$ мА значение $h \approx 40$ мкм. Полагая расстояние от краев окна под эмиттер до краев окна под базу 20 и 4 мкм с длинной и короткой сторон эмиттера соответственно ($L = 12$ мкм; $h = 40$ мкм), получаем площадь донной части коллектора $A_{к.д} \approx 2200$ мкм 2 . Для структуры *е* из соотношения (12.43) $j_{д.пв} = 4,1$ А/см 2 . Площадь донной части коллекторного перехода $A'_{к.д}$ при $I_d = 1$ мА равна $A'_{к.д} \approx 24\,400$ мкм 2 , т. е. $A'_{к.д}/A_{к.д} = 10$. Это означает, что структуру *е* нецелесообразно использовать из-за большой занимаемой площади.

§ 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 ДШ работает *на основных носителях*. В транзисторе с барьером Шотки (ТШ) отсутствуют накопление и рассасывание избыточных носителей.

12.6.1. ВАХ ДШ. Простейшая структура ДШ в ИС показана на рис. 12.17,а. При больших концентрациях примесей в месте перехода металл — полупроводник образуется омический контакт, поэтому в полупроводнике концентрация примесей $N \leq 5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. Диоды Шотки могут изготавливаться на полупроводнике как n -, так и p -типов. Однако из-за 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 $\varphi_{мн}$ — высота потенциального барьера контакта металл — полупроводник; φ_n — величина, аналогичная контактной разности потенциалов в p — n -переходе (см. § 11.2);

$$\Delta\varphi_n = \varphi_3/2 - \varphi_T \ln(N_d/n_i) \quad (12.44)$$

— 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 $\Delta\varphi_n$, по-

лучается из (12.44) заменой N_d на N_a . При приложении напряжения к диоду значение $\varphi_{мл}$ остается неизменным, а φ_n заменяется на $\varphi_n - U$, где U — внешнее напряжение. В табл. 12.5 представлены значения $\varphi_{мл}$ для n -кремния в зависимости от металла, образуя-

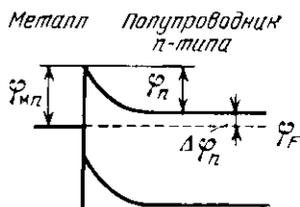
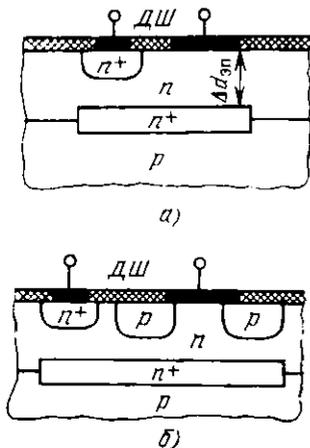


Рис. 12.18. Зонная диаграмма диода Шоттки

Рис. 12.17. Структура диодов Шоттки без охранного кольца (а) и с охранным кольцом (б)

щего ДШ. Если с помощью данного металла образуются ДШ на полупроводниках n - и p -типов, то

$$\varphi_{млn} + \varphi_{млp} = \varphi_n, \quad (12.45)$$

где $\varphi_{млp}$ — величина, аналогичная $\varphi_{млn}$.

Таблица 12.5. Высота потенциального барьера контакта металл—кремний для кремния n -типа

Металл	Na	Zr	Mo	W	Ni	Ag	Al	Cu	Pd	PtSi	Au	Pt
$\varphi_{мл}, \text{В}$	0,43	0,55	0,59	0,67	0,68	0,76	0,77	0,77	0,78	0,82	0,84	0,86

Вольт-амперная характеристика ДШ записывается в виде, аналогичном ВАХ p — n -перехода:

$$j = j_{0ш} [\exp(U/\varphi_T) - 1]; \quad (12.46a)$$

$$j_{0ш} = A^* T^2 \exp(-\varphi_{млn}/\varphi_T), \quad (12.46б)$$

где T — температура, К; A^* — постоянная Ричардсона. Для n -полупроводника $A^* = 112 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$ (для p -полупроводника $\varphi_{млn}$ заменяется на $\varphi_{млp}$ и $A^* = 32 \text{ А}/(\text{см}^2 \cdot \text{К}^2)$). Отличие ВАХ диода Шоттки от ВАХ диода на основе p — n -перехода определяется только выражением для тока $j_{0ш}$ и меньшими значениями напряжения ДШ в открытом состоянии ($U \leq 0,2 \div 0,5 \text{ В}$).

Зависимость ширины слоя пространственного заряда ДШ (Δd_n) от напряжения аналогична соответствующему соотношению для

$p-n$ -перехода с сильно различающимися концентрациями примесей:

$$\Delta d_n = \{2\epsilon_n \epsilon_0 (q N_d)\} (\varphi_n - U - \varphi_T)^{1/2}. \quad (12.47)$$

Величина φ_T появляется 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 на рис. 12.17,а напряжение пробоя оказывается 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 $j_{0ш}$ по сравнению с расчетным. Для устранения указанного эффекта делают охранное кольцо (рис. 12.17,б), которое препятствует влиянию краевых явлений.

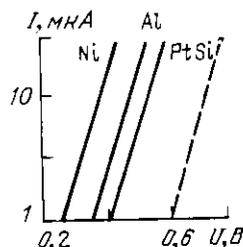


Рис. 12.19. Прямые ВАХ диодов Шотки с различными материалами контактов

Температурная зависимость напряжения ДШ в открытом состоянии, определенная из (12.46), имеет вид

$$\frac{dU}{dT} = \frac{d\varphi_{Mn}}{dT} + \frac{\varphi_T}{T} \left(\ln \frac{j}{A^* T^2} - 2 \right). \quad (12.48)$$

Значение $d\varphi_{Mn}/dT \approx -0,2$ мВ/°С. Анализ (12.48) показывает, что температурная зависимость ДШ в 1,5–2 раза слабее, чем у диодов на основе $p-n$ -переходов.

Пример. Рассчитать ВАХ ДШ (кремний n -типа) при комнатной температуре ($T=300$ К) с контактами из Ni, Al и PtSi площадью $A_{ш}=100$ мкм² без учета сопротивления тела ДШ и температурную зависимость напряжения ДШ в открытом состоянии при плотности токов, равной 1 и 100 А/см².

Используя уравнение (12.46б), значение $A^*=112$ А/(см²·К²) и данные табл. 12.5, получаем следующие значения плотности токов $j_{0ш}$, А/см²: $4,4 \cdot 10^{-5}$, $1,4 \cdot 10^{-6}$, $2 \cdot 10^{-7}$ для Ni, Al, PtSi соответственно. На рис. 12.19 представлены ВАХ диодов Шотки в диапазоне токов 1 мкА — 1 мА, полученные из уравнения (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 мкм² (см. пример п. 12.5.1). На рис. 12.19 следует читать не 10, а 100 мкА.

Из соотношения (12.48) при $d\varphi_{Mn}/dT = -0,2$ мВ/°С имеем $dU/dT = -1,77 + 0,087 \ln j$, где j — в А/см² и dU/dT — в мВ/°С. При $j=1$ А/см² значение $dU/dT = -1,77$ мВ/°С, при $j=100$ А/см² $dU/dT = -1,37$ мВ/°С.

12.6.2. 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

$$C_{0ш}(U) = \{q \epsilon_n \epsilon_0 N_d / [2(\varphi_n - U - \varphi_T)]\}^{1/2}. \quad (12.49)$$

Заряд этой емкости осуществляется через последовательное сопротивление тела ДШ ($r_{ш}$). Величина $r_{ш}$ может быть определена с

помощью соотношений (12.3). Предельная рабочая частота ДШ ($f_{сш}$), определяемая зарядом емкости $C_{ш}$ ($C_{ш} = C_{0ш} A_{ш}$, где $A_{ш}$ — площадь барьера Шотки), находится из соотношения, аналогичного (12.9),

$$f_{сш} = (2\pi\tau_{сш})^{-1} = (2\pi r_{ш} C_{ш})^{-1}. \quad (12.50)$$

Формула (12.50) справедлива при

$$r_{с.ш} \gg r_{ш}, \quad (12.51)$$

где

$$r_{с.ш} = \varphi_T / (j A_{ш}) \quad (12.52)$$

— сопротивление барьера Шотки, определяемое из уравнения (12.46а). Условие (12.51) обычно выполняется, если $\varphi_n - U - \varphi_T \geq \geq 0,1$ В. Из (12.49)

$$C_{ш}(U_1) \approx C_{ш}(0) \sqrt{10 \varphi_n}, \quad (12.53)$$

где $U_1 = \varphi_n - \varphi_T - 0,1$ В; φ_n и φ_T — в вольтах.

Для минимизации части $r_{ш}$, определяемой сопротивлением скрытого n^+ -слоя, целесообразно делать контакт ДШ в виде узкой и длинной полоски.

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

$$j \leq (2-3) j_n, \quad (12.54a)$$

где пороговая плотность тока

$$j_n = q N_d D_n / \Delta d_{оп}. \quad (12.54b)$$

Соответствующая выражениям (12.54) постоянная времени накопления неосновных носителей

$$\tau_{н.ш} \approx \tau_n q n^2_i \Delta d_{оп} / (N_d j_{оп}). \quad (12.55)$$

Если плотность тока $j > (2-3) j_n$, значение $\tau_{н.ш}$ увеличивается на несколько порядков. Соответствующая формуле (12.55) предельная частота ($f_{н.ш}$) получается из выражения (12.50) заменой постоянной времени $\tau_{сш}$ на $\tau_{н.ш}$. Предельные частоты $f_{сш}$ и $f_{н.ш}$ ограничивают быстродействие ДШ. Из анализа формулы (12.55) следует, что для уменьшения постоянной времени $\tau_{н.ш}$ (увеличения частоты $f_{н.ш}$) следует использовать низкоомные подложки и материал контакта ДШ с малым значением $\varphi_{мл}$.

Пример. Рассчитать для контакта из Al при концентрациях донорной примеси $N_d = 10^{14}$; 10^{16} см $^{-3}$: пороговую плотность тока j_n , постоянную времени $\tau_{н.ш}$, частоту $f_{н.ш}$. Примем $\Delta d_{оп} = 3$ мкм; $D_n = 33$ см 2 /с при $N_d = 10^{14}$ см $^{-3}$; $D_n = 26$ см 2 /с при $N_d = 10^{16}$ см $^{-3}$; $j_{оп} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ А/см 2 (см. пример п. 12.6.1).

Из выражений (12.50), (12.54б), (12.55) получим: при $N_d = 10^{14}$ см $^{-3}$ $j_n = 1,8$ А/см 2 ; $\tau_{н.ш} = 8 \cdot 10^{-11}$ с; $f_{н.ш} = 2$ ГГц и при $N_d = 10^{16}$ см $^{-3}$ $j_n = 140$ А/см 2 ; $\tau_{н.ш} = 8 \cdot 10^{-13}$ с; $f_{н.ш} = 200$ ГГц.

12.6.3. Транзисторы с барьером Шоттки. В настоящее время в логических ИС 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 охранная p -область, являющаяся частью базовой. Если указанные

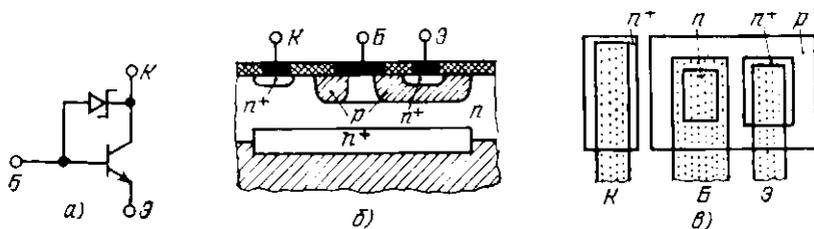


Рис. 12.20. Электрическая схема (а), структура (б) и топология (в) транзистора с барьером Шоттки

характеристики не важны, то используется ДШ без охранной 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. $f_{сш, п.ш} \geq (4-5)f_{\alpha}$.

Из схемы рис. 12.20,а получим ток, протекающий через ДШ, когда транзистор насыщен:

$$I_d = I_k(S-1)/(B+1), \quad (12.56)$$

а $S = BI_0/I_{к.н}$ — степень насыщения транзистора (см. п. 12.1.2).

Наряду с одноэмиттерными получили распространение и многоэмиттерные (МЭТ) ТШ.

Благодаря меньшим напряжениям, падающим на ДШ, работающим в прямом направлении, чем на $p-n$ -переходе, ТШ имеют малый инверсный коэффициент усиления. Используя соотношения (11.16), (12.28а), (12.46), получаем

$$B_I = I_0/I_0 \approx qn^2_i D_n K_{ш} \exp(\Phi_{мн}/\Phi_T)/(N_T j_{0ш}), \quad (12.57)$$

где $K_{ш}$ — отношение площади донной части эмиттерного перехода к площади части базового контакта, являющейся ДШ ($A_{ш}$), и N_T — число Гуммеля активной базовой области.

Пример. Рассчитать площадь части базового контакта ТШ из Al, являющегося ДШ ($A_{ш}$) в $n-p-n$ -транзисторе с частотой $f_{\alpha} = 850$ МГц и зависимость значения B_I от $K_{ш}$. Примем $N_k = 10^{16}$ см⁻³; $B = 300$; $D_n = 18,2$ см²/с; $N_T = 2,1 \cdot 10^{12}$ см⁻² (см. примеры пп. 12.1.4 и 12.3.1). Будем полагать, что степень насыщения $S = 30$ при коллекторном токе $I_k = 1,8$ мА.

Как следует из примера п. 12.6.2, при $N_k = 10^{16}$ см⁻³ постоянная времени $\tau_{п.ш}$ практически не ухудшает быстродействия ТШ. Поэтому необходимо ограничить значение $\tau_{сш}$. Из выражения (12.56) максимальный ток, протекающий

через ДШ, $I_d = 0,18$ мА. При $j = 2j_n = 280$ А/см² [см. (12.54) и пример п. 12.6.2] получим площадь $A_{ш} = 64$ мкм². Из соотношений (12.49), (12.53) при $\varphi_n = 0,57$ В имеем $C_{ш}(U_i) = 0,06$ пФ. При $f_{сш} = 5f_\alpha$ из (12.50) $r_{ш} \leq 0,6$ кОм, реализуемое на практике (см. пример п. 12.1.2). Инверсный коэффициент усиления при $f_{ш} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ А/см² $B_I = 2 \cdot 10^{-4}$ Кш. Изменение значения $K_{ш}$ позволяет варьировать B_I .

§ 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

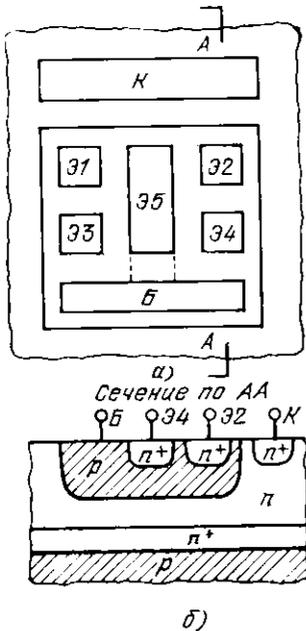


Рис. 12.21.

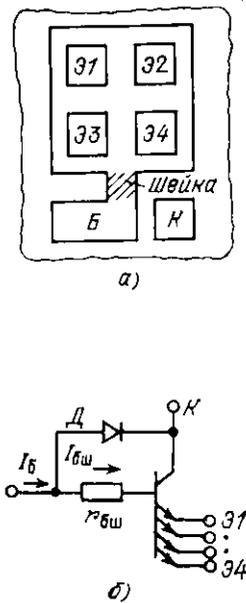


Рис. 12.22.

Рис. 12.21. Топология (а) и структура (б) МЭТ с закорачиваемым эмиттером

Рис. 12.22. Топология (а) и электрическая схема (б) МЭТ с «шейкой»

необходимо минимизировать коэффициент передачи такого транзистора. В реальных МЭТ, в отличие от горизонтальных $p-n-p$ -транзисторов (см. п. 12.4.2), коэффициент κ $n-p-n$ -транзистора весьма мал, так как $l \approx L_n$ 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.

Другим важным требованием, предъявляемым к электрическим характеристикам МЭТ, является минимизация инверсного коэффициента усиления B_I , рассчитанного на один эмиттер. Обычно стремятся обеспечить B_I порядком сотых долей. Для уменьшения B_I в МЭТ на рис. 12.21 эмиттер Э5 соединяется с контактом базовой области (штриховая линия рис. 12.21,а). По аналогии со способом стабилизации коэффициента усиления многоколлекторного горизонтального $p-n-p$ -транзистора (см. п. 12.4.4) получим

$$B'_I = B_I / (1 + KB_I), \quad (12.58)$$

где B'_I — инверсный коэффициент усиления, рассчитанный на один эмиттер; K равно отношению площади донной части Э5 к площади донной части любого другого эмиттера (Э1—Э4). Как видно из (12.58), для уменьшения B_I необходимо увеличивать K . Кроме того, заметный результат получается только при $B_I \geq 1$, а при $B_I \ll 1$ такой способ уменьшения B_I оказывается малоэффективным.

Большими возможностями для минимизации B_I 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 эквипотенциальности коллекторного перехода при инверсном включении МЭТ. Как видно из рис. 12.22,б, область контакта к базе (диод D) имеет большее на величину $\Delta U_{к.б}$ смещение, чем основная часть коллекторного перехода, в которой расположены эмиттеры. Это вызывает появление части базового тока, минуящего 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»). Специфическим является расчет необходимого сопротивления $r_{б.ш}^*$, обеспечивающего требуемое значение B'_I . По аналогии с расчетом инверсного коэффициента усиления [см. соотношение (12.28б) и рис. 12.10]

$$(B'_I)^{-1} = (e^{w_1/d_{об}} - 1) \left\{ \frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_1 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{зп}}{L_p} + K_2 \right) + \frac{K_1 - n}{e^{w_2/d_{об}} - 1} + \right. \\ \left. + \left[\frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_3 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{зп}}{L_p} + K_4 \right) + \frac{K_3 + K_4}{e^{w_2/d_{об}} - 1} \right] e^{\Delta U_{к.б}/m \Phi_T} \right\}, \quad (12.59)$$

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 — постоян-

* 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.

ный коэффициент, учитывающий отличие ВАХ идеального перехода от реального ($1 \leq m \leq 2$). Из (12.59)

$$\Delta U_{к.б} = m \varphi_T \left\{ \left[\ln \left\{ \frac{1}{B'_I [\exp(\omega_1/d_{об}) - 1]} - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \left[\frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_1 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{эп}}{L_p} + K_2 \right) + \frac{K_1 - n}{\exp(\omega_2/d_{об}) - 1} \right] \right\} - \right. \\ \left. \left. - \ln \left[\frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_3 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{эп}}{L_p} + K_4 \right) + \frac{K_3 + K_4}{\exp(\omega_2/d_{об}) - 1} \right] \right] \right\}. \quad (12.60a)$$

Пренебрегая малыми членами в (12.60a), получаем

$$\Delta U_{к.б} = -m \varphi_T \ln \left\{ B'_I (e^{\omega_1/d_{об}} - 1) \left[\frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_3 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{эп}}{L_p} + K_4 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_3 + K_4}{\exp(\omega_2/d_{об}) - 1} \right] \right\}. \quad (12.60б)$$

Падение напряжения $\Delta U_{к.б}$ на сопротивлении «шейки» определяется базовым током, втекающим в основную область базы. Ток

$$I_{б.ш} = I_б B'_I / B_I, \quad (12.61)$$

где B_I — инверсный коэффициент усиления без учета влияния резистора $r_{б.ш}$; $I_б$ — полный базовый ток МЭТ. Из (12.61)

$$\Delta U_{к.б} = r_{б.ш} I_б B'_I / B_I. \quad (12.62)$$

Выражение для B_I имеет вид [см. рис. 12.10 и (12.28)]

$$(B_I)^{-1} = (e^{\omega_1/d_{об}} - 1) \left[\frac{D_p d_{об}}{D_n L_p} \left(K_1 \operatorname{th} \frac{\Delta d_{эп}}{L_p} + K_2 \right) + \frac{K_1 - n}{\exp(\omega_2/d_{об}) - 1} \right]. \quad (12.63)$$

Величина $r_{б.ш}$ из выражения (12.62) запишется как

$$r_{б.ш} = \Delta U_{к.б} B_I / (I_б B'_I). \quad (12.64)$$

Пример. Рассчитать сопротивление $r_{б.ш}$ для получения $B'_I = 0,02$ 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; $d_{об} = 0,39$ мкм; $\omega_1 = 0,6$ мкм; $\omega_2 = 2,3$ мкм; $d_{к.б} = 2,4$ мкм; $\Delta d_{эп} = 2,6$ мкм; площади донных частей эмиттерного перехода $A_{э.д} = 144$ 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; $I_б = 1$ 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 усиления без учета влияния «шейки» [см. (12.63)] $B_I = 1,58$. Из выражения (12.60 б) получим $\Delta U_{к.б} = 0,163$ В. Из (12.64) $r_{б.ш} = 12,9$ кОм.

Глава 13

Проектирование пассивных элементов биполярных интегральных полупроводниковых микросхем

§ 13.1. Проектирование диффузионных конденсаторов

Для изготовления конденсаторов на основе $p-n$ -переходов используются обратносмещенные либо коллекторный, либо эмиттерный переходы, либо оба перехода, включенные параллельно.

13.1.1. Структура диффузионного конденсатора. На рис. 13.1 показаны структура конденсатора на основе $p-n$ -перехода и его эквивалентная схема: L_1, L_2 — длины окон под базовую и разделительную диффузии; $C_э, C_к, C_п$ — емкости эмиттерного, коллекторного и паразитного изолирующего переходов; $D_э, D_к, D_п$ — соответствующие диоды; r_p — результирующее последовательное сопротивление базовой и коллекторной областей. Для нормальной работы конденсатора необходимо обеспечивать закрытое состояние всех $p-n$ -переходов.

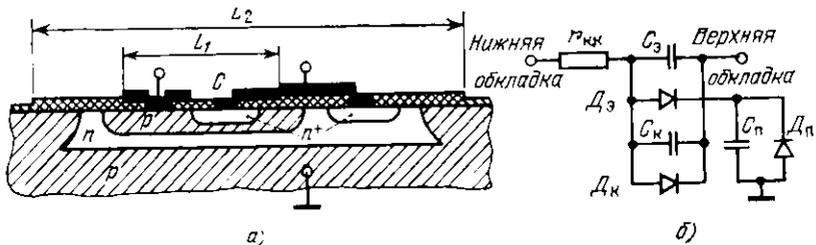


Рис. 13.1. Структура конденсатора на основе $p-n$ -переходов (а) и его эквивалентная схема (б)

Из соображений экономии площади емкость конденсаторов обычно не превышает 200 пФ. Допуск на емкость определяется диффузионными процессами и составляет около 20%. Роль паразитной емкости $C_п$ 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 $C/C_п \leq 7-10$. 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 и при глубине залегания изолирующего перехода, равной толщине эпитаксиальной пленки ($d_{из} = d_{эп}$), для полной площади поверхности перехода

$$A_{из} = A_{из.д} + A_{из.б} = L_2 L'_2 + [\pi d_{из} (L_2 + L'_2) - 8 d_{из}^2], \quad (13.1a)$$

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 d_k определяется как

$$A_k = A_{к.д} + A_{к.б} = L_1 L'_1 + [\pi d_k (L_1 + L'_1) + 2\pi d_k^2], \quad (13.16)$$

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 $L \geq 400$ мкм ошибка от замены полной площади перехода площадью основания не превышает 5%.

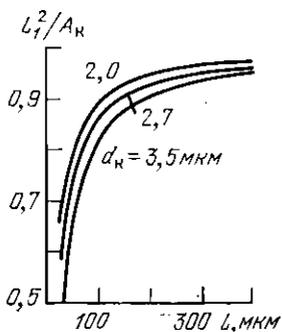


Рис. 13.2.

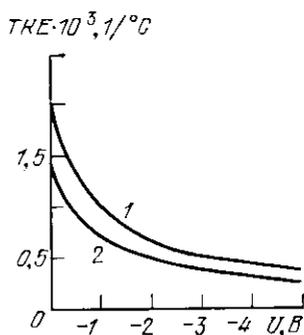


Рис. 13.3.

Рис. 13.2. Зависимости отношения площади донной части коллекторного $p-n$ -перехода к его полной площади от длины окна под базовую диффузию

Рис. 13.3. Зависимость ТКЕ от запирающего напряжения на $p-n$ -переходе

Пример. Рассчитать геометрические размеры квадратного конденсатора емкостью $C = 55$ пФ (при напряжении на переходе $U = 0$) с напряжением пробоя $U_{пр} \geq 30$ В.

Будем использовать коллекторный переход. Из табл. 11.2 и примера § 11.3 получим: $d_k = 2,4$ мкм; $C_0 = 220$ пФ/мм²; $U_{пр} \approx 40$ В. Площадь перехода $A_k = C/C_0 = 0,25$ мм². С погрешностью менее 5% величина $A_k = L_1^2$. Отсюда $L_1 \approx \approx 500$ мкм.

13.1.2. Температурный коэффициент емкости конденсатора. Исходя из формулы (11.1) выражения для барьерной емкости можно представить в виде

$$C_0 = f_1(N) \sqrt{\epsilon_n / (\Delta\Phi_0 - U)} \quad (13.2a)$$

для ступенчатого перехода,

$$C_0 = f_2(N) \sqrt[3]{\epsilon_n^2 / (\Delta\Phi_0 - U)} \quad (13.26)$$

для линейного.

Функции $f_1(N)$ и $f_2(N)$ 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 емкости

$$\text{TKE} = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{2} \left[\text{TK}(\epsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} \text{TK}(\Delta\varphi_0) \right] \quad (13.3a)$$

для ступенчатого перехода,

$$\text{TKE} = \frac{1}{3} \left[2 \text{TK}(\epsilon_n) - \frac{\Delta\varphi_0}{\Delta\varphi_0 - U} \text{TK}(\Delta\varphi_0) \right] \quad (13.3б)$$

для линейного.

В рабочем диапазоне температур ($-60 \div +125^\circ\text{C}$) $\text{TK}(\epsilon_n) \approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\text{TK}(\Delta\varphi_0) = -(3-6) \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.

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 $\text{TK}(\Delta\varphi_0) = -3 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, а кривая 2 соответствует выражению (13.3a) при $\Delta\varphi_0 = 0,7 \text{ В}$ и $\text{TK}(\Delta\varphi_0) = -6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Реальные зависимости лежат между кривыми 1 и 2. Как видно из рисунка, при увеличении напряжения $|U|$ происходит уменьшение вклада $\text{TK}(\Delta\varphi_0)$, и если $|U| \gg \Delta\varphi_0$, то определяющую роль играет $\text{TK}(\epsilon_n)$.

§ 13.2. Проектирование резисторов

Резисторы биполярных ИС обычно изготавливаются на основе отдельных диффузионных областей транзисторной структуры.

13.2.1. 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 проведе-

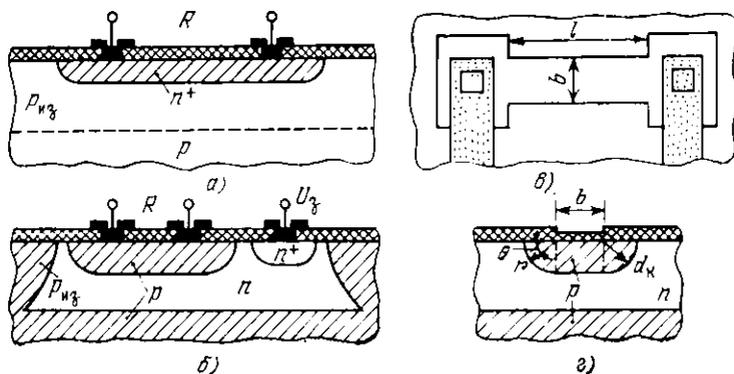


Рис. 13.4. Структура диффузионного резистора на основе эмиттерного n^+ -слоя (а) и базового n -слоя (б), топология резистора на основе p -слоя (в) и структура его канала (г)

нии изолирующей диффузии ($P_{из}$). 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 напряжения на клеммах 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

$$G = G_{ср} + 2G_6, \quad (13.4)$$

где $G_{ср}$ — проводимость средней части (шириной b); G_6 — проводимость боковых частей (ограниченных четвертью окружности с радиусом d_k , рис. 13.4,г). Выражения для $G_{ср}$ и G_6 [см. (11.5)] имеют вид:

$$G_{ср} = bG_s/l; \quad (13.5а)$$

$$G_6 = \frac{q}{l} \int_0^{\pi/2} d\theta \int_0^{d_k} \mu_p(N) N(r) r dr, \quad (13.5б)$$

где θ и r — координаты точек боковых частей диффузионной области. Произведя интегрирование в (13.5б) при $d_k = \infty$ (см. п. 11.4.1), получим

$$G_6 = q\pi K d_{06}^2 N_{s6}^{m+1} / [4l(m+1)]. \quad (13.6)$$

Сопротивление средней части резистора (длиной l) без учета влияния боковых частей

$$R_{ср} = R_s l/b. \quad (13.7а)$$

Учет влияния боковых частей ДР на его сопротивление осуществим введением Δb_6 в эффективную ширину $b_{эф} = b + 2\Delta b_6$. При этом выражение (13.7а) запишем как

$$R = R_s l/b_{эф} = R_s l/(b + 2\Delta b_6). \quad (13.7б)$$

Используя (11.9) и (13.6), получаем

$$\Delta b_6 = (d_{06}/2) \sqrt{\pi/(m+1)}, \quad (13.8а)$$

а подставляя численные значения π и m [см. (11.6б)], имеем

$$\Delta b_6 = 1,02 d_{06}. \quad (13.8б)$$

13.2.2. Расчет геометрических размеров ДР. Диффузионные резисторы имеют либо прямолинейную (см. рис. 13.4,в), либо зигзагообразную (рис. 13.5,а) структуру. Сопротивление резистора

$$R = R_s \left(\sum_{i=1}^{n+1} l_i/b_{эф} + 0,55n + K_1 + K_2 \right), \quad (13.9)$$

где n — число изломов; 0,55 — эквивалентное число квадратов, определяющее сопротивление области излома — квадрата со стороной b ; K_1 и K_2 — постоянные, зависящие от формы и размеров контактных площадок (рис. 13.5). Значения K находятся из номограмм рис. П.3. На рис. 13.6 представлена зависимость K от геометрических размеров контакта, показанного на рис. 13.5, в при $c = b + a - d$.

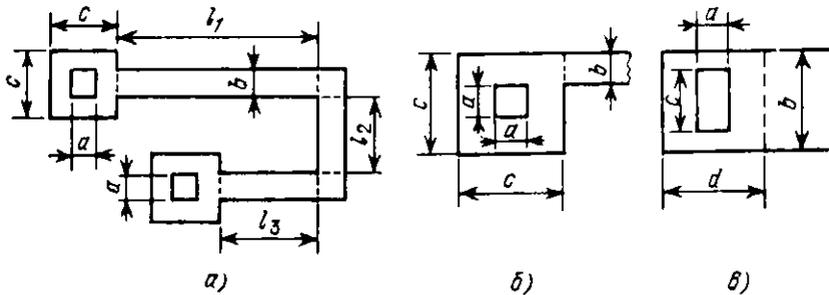


Рис. 13.5. Топологии диффузионного резистора зигзагообразной формы (а), а также несимметричной (б) и симметричной (в) контактных площадок

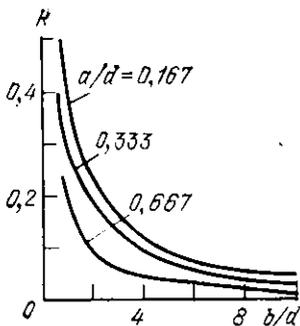


Рис. 13.6. Зависимость коэффициента, характеризующего сопротивление контактных площадок, от их геометрических размеров

Диффузионный резистор на основе базовой диффузии с сопротивлением 50—500 Ом обычно имеет прямолинейную конфигурацию с контактами, показанными на рис. 13.5, в; ДР с сопротивлением 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

$$b_{эф} = \max \{ b_{эф.о}; b_{эф.р}; b_{эф.т} \}, \quad (13.10)$$

где $b_{эф.о}$ — минимальная эффективная ширина ДР, определяемая технологическими ограничениями; $b_{эф.р}$ — минимальная эффективная ширина ДР, определяемая допустимой удельной рассеиваемой мощностью (P_0); $b_{эф.т}$ — минимальная эффективная ширина ДР,

обеспечивающая заданную точность изготовления. Величина $b_{\text{эф.р}}$ определяется минимально допустимой шириной резистора (см. табл. II.1). Значение $b_{\text{эф.р}}$ находится из выражения для допустимой мощности (P), рассеиваемой ДР, которая должна удовлетворять неравенству

$$P \leq b_{\text{эф.р}} l P_0, \quad (13.11a)$$

где $P_0 \approx 5$ Вт/мм² — допустимая удельная мощность. Из выражений (13.7б) и (13.11a)

$$b_{\text{эф.р}} = \sqrt{R_s P / (R P_0)}. \quad (13.11б)$$

Значение $b_{\text{эф.т}}$ определяется методом наихудшего случая с учетом технологического разброса значений b , l , R_s :

$$R \pm \Delta R = (R_s \pm \Delta R_s) (l \pm 2 \Delta l) / (b_{\text{эф.т}} \mp 2 \Delta b_t). \quad (13.12)$$

Учитывая, что $\Delta l_t = \Delta b_t$ (разброс линейных размеров одинаков), имеем

$$\Delta R / R \approx 2 \Delta b_t / b_{\text{эф.т}} + 2 \Delta b_t / l + \Delta R_s / R_s. \quad (13.13)$$

Соотношение (13.13) определяет относительный разброс сопротивления резистора. Из (13.13)

$$b_{\text{эф.т}} = 2 \Delta b_t / (\Delta R / R - 2 \Delta b_t / l - \Delta R_s / R_s). \quad (13.14)$$

При достаточно большом значении $b_{\text{эф.т}}$ и при $l > b_{\text{эф.т}} \gg \Delta b_t$ из (13.13) минимальный разброс $(\Delta R / R)_{\text{min}} = \Delta R_s / R_s$. Обычно $\Delta R_s / R_s = 5 - 10\%$.

Разброс отношения сопротивлений R_1 и R_2 , изготовленных в едином технологическом цикле, не зависит от разброса сопротивлений слоев и при наихудшем сочетании отклонений Δb_t определяется как

$$\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_2 - \Delta R_2} \approx 1 + 2 \Delta b_t \left(\frac{1}{b_{\text{эф.1}}} + \frac{1}{b_{\text{эф.2}}} + \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right). \quad (13.15)$$

Из (13.15) видно, что при $b_{\text{эф.1}} = b_{\text{эф.2}}$ 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 $|\Delta R_s| / R_s = 7\%$. При найденных геометрических размерах определить разброс сопротивления вероятностным методом (см. § 11.6). Будем считать, что минимальная ширина окна для изготовления резистора $b_{\text{min}} = 4$ мкм, систематическая ошибка, связанная с растравливанием окисла $\Delta b_c = 0,75$ мкм; ошибка в линейных размерах при изготовлении фотомаски $\Delta b_{\text{ф}} = \Delta b_t = \pm 0,4$ мкм, $R_s = 180$ Ом/□ (см. пример п. 11.4.1).

Из (13.8б) получим $\Delta b_{\text{ф}} \approx 1,0$ мкм. Тогда

$$b_{\text{эф.о}} = b_{\text{min}} + 2 (\Delta b_c + \Delta b_{\text{ф}}) \approx 7,5 \text{ мкм.}$$

Считая $l \gg b$, из (13.14) получаем $b_{\text{эф.т}} \approx 27$ мкм. Из выражения (13.11б) $b_{\text{эф.р}} \approx 6$ мкм. Из формулы (13.10) имеем $b_{\text{эф}} \approx 27$ мкм. Ширина окна вскрытия по фо-

тошаблоны $b = b_{\text{эф}} - 2(\Delta b_c + \Delta b_\delta) = 23,5$ мкм. Примем $b = 24$ мкм. Из формулы (13.9)

$$\sum_{i=1}^{n+1} l_i = b_{\text{эф}} (R/R_s - 0,55n - K_1 - K_2).$$

Примем $c = 16$ мкм; $a = 4$ мкм; $d = 12$ мкм (см. рис. 13.5, в). Для нахождения значений K_1 и K_2 из рис. 13.6 вместо величин b , d , a следует использовать $b_{\text{эф}}$, $d_{\text{эф}}$, $a_{\text{эф}}$, которые учитывают влияние Δb_c и Δb_δ :

$$d_{\text{эф}} = d + 2(\Delta b_c + \Delta b_\delta) = 15,5 \text{ мкм};$$

$$a_{\text{эф}} = a + 2\Delta b_c = 5,5 \text{ мкм}.$$

Значения $b_{\text{эф}}/d_{\text{эф}} = 1,8$; $a_{\text{эф}}/d_{\text{эф}} = 0,35$, а $K_1 = K_2 = 0,21$. При этом суммарная длина линейных участков $\sum_{i=1}^3 l_i = 184$ мкм.

Разброс сопротивления, полученный вероятностным методом при найденных значениях геометрических размеров резистора, найдем из соотношений (11.276), (11.29). Примем $\sigma_i = \delta_i/3$, где δ_i — относительный разброс какого-либо параметра. Тогда

$$\delta = \Delta R \cdot 100\% / R \approx 7,5\%.$$

Полученное значение, как и следовало ожидать, не намного (на 2,5%) отличается от заданного.

13.2.3. Температурная зависимость сопротивления ДР. Зависимость сопротивления от температуры определяется температурными характеристиками подвижности и концентрации примесей. В общем виде

$$\text{TKC} = (1/R) \partial R / \partial T. \quad (13.16)$$

На рис. 13.7 представлены средние значения ТКС в диапазоне температур $-60 \div +125^\circ\text{C}$ при различных удельных сопротивлениях слоя базы. При эмиттерной диффузии ($R_s = 2-5$ Ом/□) $\text{TKC} \approx 0,02\% / ^\circ\text{C}$.

13.2.4. Резисторы на основе слоя базы, ограниченного слоем эмиттера (пинч-резисторы). На рис. 13.8 показана структура пинч-резистора. Для обеспечения закрытого состояния переходов, образующих резистор, напряжение U_z должно быть больше напряжений, подаваемых на клеммы резистора.

Расчет сопротивлений 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. (13.9)] и участков резистора, не перекрытых эмиттерной диффузией.

Сопротивление пинч-резистора ввиду малой толщины слоя w , его образующего ($w < w_0 = 0,5-1,0$ мкм), и большого влияния толщины слоев пространственного заряда на w в сильной степени зависит от падения напряжения на резисторе. На рис. 13.9 показана ВАХ пинч-резистора. 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, а дифференциаль-

ное сопротивление резистора резко возрастает. На участке 3 происходит пробой эмиттерной части перехода, образующего пинч-резистор ($U_{пр} \approx 6-9$ 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 ω , d_k и ρ_k .

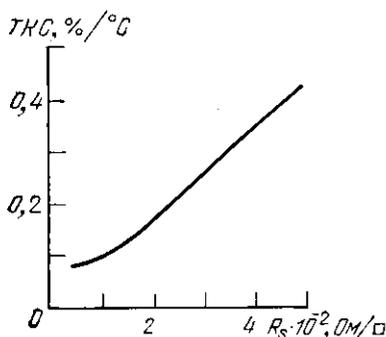


Рис. 13.7. Зависимость ТКС от удельного сопротивления диффузионного p -слоя

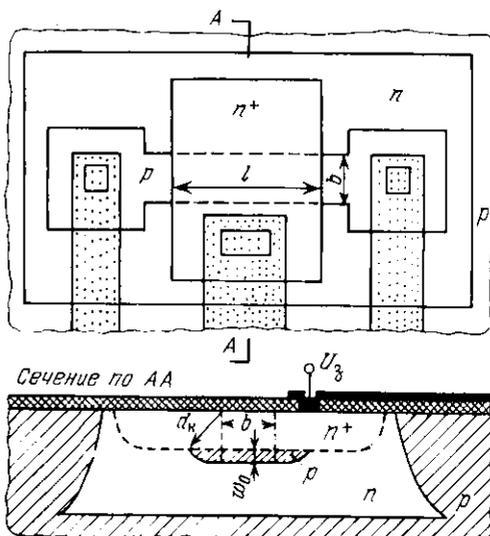


Рис. 13.8. Структура пинч-резистора

Разброс значений этих величин определяет отклонение сопротивления резистора от номинала. Особенно затруднительно обеспечить повторяемость ω при малых ее значениях. Это приводит к тому, что абсолютный разброс сопротивления пинч-резисторов со-

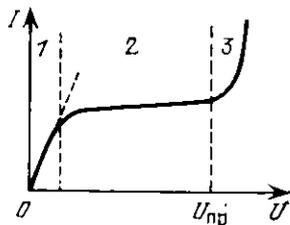


Рис. 13.9.

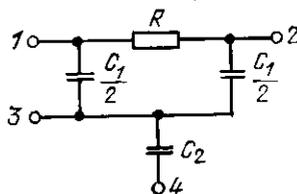


Рис. 13.10.

Рис. 13.9. ВАХ пинч-резистора

Рис. 13.10. Эквивалентная схема диффузионных резисторов

ставляет приблизительно 50%. Кроме того, пинч-резистор имеет относительно большой температурный коэффициент $TKC = 0,3-0,5$ $\%/^{\circ}C$.

Соотношение (13.7а) и значение удельного сопротивления слоя канала R_s (см. п. 11.4.2) позволяют определить сопротивление пинч-резистора.

Пример. Рассчитать длину пинч-резистора l с $R=200$ кОм при напряжении на клеммах, равном нулю. Примем: $b=20$ мкм; $\Delta b_c=0,75$ мкм; напряжение $U_a=-2$ В. Будем считать, что $R_s=17$ кОм/□; $d_k=2,4$ мкм; $w=0,3$ мкм; $\Delta d_{k,p}=0,24$ мкм; $d_b=1,7$ мкм (см. пример п. 11.4.2).

Из (13.7а) с учетом значения Δb_c получим $l=253$ мкм.

13.2.5. 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 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). Клеммы 1, 2 и 3, 4 — это входная, выходная клемма 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 клемма 3 заземлена по переменному сигналу и постоянная времени, определяющая длительность переходного процесса,

$$\tau_{гр} = RC_1/2. \quad (13.17)$$

Соответствующая частота $f_{гр}$ 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; $d_b=2$ мкм; $d_k=-3$ мкм; $R_{s,b}=200$ Ом/□; удельное сопротивление базового слоя, ограниченного эмиттерным, $R_s=11,6$ кОм/□; $C_{вад}=1000$ пФ/мм²; $C_{ок}=150$ пФ/мм². Будем считать, что резисторы имеют прямолинейную конфигурацию (см. рис. 13.4, в).

Используя приближенную формулу (13.7а) и считая емкость контактов $C_{конт}=1$ 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), (13.17)] равны 10 и 160 кГц для резистора на основе базового слоя и пинч-резистора.

Глава 14

Проектирование элементов МДП-интегральных полупроводниковых микросхем

§ 14.1. Проектирование МДП-конденсаторов

Конденсаторы со структурой МДП требуют изготовления тонкого окисла, такого же, как и у МДП-транзисторов. Поэтому их использование в ИС на биполярных транзисторах нецелесообразно, так как приводит к усложнению технологии изготовления бипо-

лярных ИС. Применение МДП-конденсаторов целесообразно только в ИС на основе МДП-транзисторов.

14.1.1. Идеальный МДП-конденсатор. На рис. 14.1,а показана упрощенная структура МДП-конденсатора. Обычно в качестве диэлектрика в этих конденсаторах используется двуокись кремния. Верхняя обкладка конденсатора — металл, нижняя — полупроводник *n*- или *p*-типа.

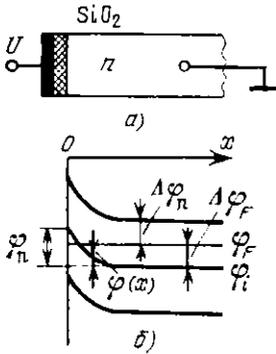


Рис. 14.1.

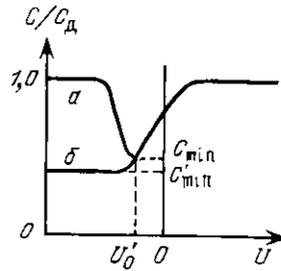


Рис. 14.2.

Рис. 14.1. Структура (а) и зонная диаграмма (б) МДП-конденсатора

Рис. 14.2. Зависимость относительной емкости МДП-конденсатора от приложенного напряжения

Рассмотрим характеристики идеального конденсатора, в котором не учитываются поверхностные состояния на границе диэлектрик—полупроводник, разность работ 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,

$$C_{0d} = \epsilon_d \epsilon_0 / d_d, \quad (14.2)$$

где d_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, концентрация электронов в поверхностном слое уменьшается и образуется область пространственного заряда толщиной

$$d_n \approx \sqrt{2\epsilon_n \epsilon_0 |\varphi_n| / (q N_d)}. \quad (14.3)$$

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 $L_D \approx \sqrt{2 \epsilon_n \epsilon_0 \varphi_T / (q N_D)}$ — длина Дебая.

При $\varphi_n = 2\Delta\varphi_F$ наступает сильная инверсия и ширина слоя пространственного заряда достигает максимального значения.

$$d_{n \max} = 2 \sqrt{\epsilon_n \epsilon_0 |\Delta\varphi_F| / (q N_D)}. \quad (14.5)$$

Соответствующее $d_{n \max}$ напряжение

$$U'_0 \approx -Q_n / C_{0d} + 2\Delta\varphi_F \approx -q N_D' d_{n \max} / C_{0d} + 2\Delta\varphi_F, \quad (14.6)$$

где $Q_n = Q_p + q N_D d_n$ — плотность положительного заряда в приповерхностном слое; Q_p — соответствующая плотность пространственного заряда дырок. В выражении (14.6) полагалось, что $Q_p \ll q N_D d_{n \max}$. 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 b , $U < 0$).

В диапазоне изменения $0 < |\varphi_n| < 2|\Delta\varphi_F|$

$$C_n = \epsilon_n \epsilon_0 / d_n. \quad (14.7)$$

Как следует из (14.1),

$$C'_{0 \min} = \epsilon_d \epsilon_0 / [d_d + (\epsilon_d / \epsilon_n) d_{n \max}]. \quad (14.8)$$

Величина $\Delta\varphi_n$ (см. рис. 14.1, b) находится из соотношения (12.44), а

$$\Delta\varphi_F = \Delta\varphi_n - \varphi_s / 2 = -\varphi_T \ln(N_D / n_i). \quad (14.9)$$

14.1.2. Реальный МДП-конденсатор. На рис. 14.3 показана структура МДП-конденсатора, используемая в ИС (d_d — толщина пленки диэлектрика). Отличие ее от структуры на рис. 14.1 состоит

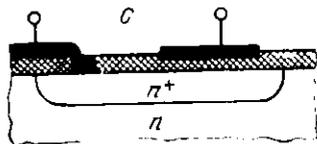


Рис. 14.3. Структура интегрального МДП-конденсатора

в том, что для уменьшения последовательного сопротивления нижней обкладки конденсатора используется p^+ -слой. Наличие последнего также уменьшает зависимость емкости от внешнего напряжения.

Анализ поверхностных состояний на границе раздела Si-SiO_2 показывает, что их учет эквивалентен введению в (14.6) некоторо-

го 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 кристалло-

Таблица 14.1. Плотность заряда поверхностных состояний

Кристаллографическая плоскость	$\langle 111 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	$\langle 100 \rangle$
$(Q_{п.с}/q) \cdot 10^{-11},$ $см^{-2}$	5,0	2,0	0,9

Таблица 14.2. Работа выхода металлов

Металл	Mg	Al	Ni	Cu	Ag	Pt	Au
$\varphi_m, В$	3,7	4,3	4,5	4,4	4,3	5,3	4,8

графических плоскостей. Разность работ выхода структуры металл—диэлектрик—полупроводник

$$\varphi_{МДП} = \varphi_m - \varphi_{п.д} - \varphi_s/2 - \Delta\varphi_F, \quad (14.10)$$

где φ_m и $\varphi_{п.д}$ — работа выхода металла и высота потенциального барьера на границе полупроводник—диэлектрик. Для границы раздела Si—SiO₂ $\varphi_{п.д} = 4,35 В$ при $T = 300 К$. Значения φ_m для различных металлов приведены в табл. 14.2. Учет также пространственный заряд, обычно присутствующий в диэлектрике (Q_d).

Рассмотренные три фактора влияют на величину U_0 . С их учетом из (14.6)

$$U_0 = -(Q_{п} + Q_{п.с} + Q_d)/C_{од} + 2\Delta\varphi_F + \varphi_{МДП}, \quad (14.11a)$$

где U_0 — пороговое напряжение транзистора. Как правило, $Q_d > 0$ и его значение определяется качеством технологического процесса изготовления ИС. Оно может меняться в довольно широких пределах, ухудшая стабильность U_0 . Для обеспечения постоянства U_0 необходимо, чтобы $Q_d \ll (Q_{п} + Q_{п.с})$. Специальные методы стабилизации Q_d позволяют обеспечить $Q_d < 10^{-8}$ Кл/см², что снижает его влияние [$Q_{п.с} = (1,4-8,0) \cdot 10^{-8}$ Кл/см², см. табл. 14.1]. Поэтому при оценочных расчетах Q_d можно не учитывать и использовать соотношение

$$U_0 = -(Q_{п} + Q_{п.с})/C_{од} + 2\Delta\varphi_F + \varphi_{МДП}. \quad (14.11б)$$

В табл. 14.3 показаны знаки величин, входящих в соотношение (14.11б). В соответствии с выражением (14.11б) наличие $Q_{п.с}$ и $\varphi_{МДП}$ вызывает сдвиг вольт-фарадной характеристики МДП-конденсатора по оси напряжений.

Таблица 14.3. Знаки величин, входящих в соотношение (14.11б)

Тип проводимости полупроводника	Знаки величин			
	$Q_{п.с}$	$Q_{п}$	$\Delta\varphi_F$	$\varphi_{МДП}$
n	+	+	-	-
p	+	-	+	-

В некоторых случаях используется диэлектрик более сложной структуры: нитрид кремния (Si_3N_4) — двуокись кремния — кремний. В этом случае для использования формулы (14.2) необходимо заменить ϵ_d на эффективное значение

$$\epsilon_{d,\text{эф}} = \epsilon_{d1} \epsilon_{d2} d_d / (\epsilon_{d2} d_{d1} + \epsilon_{d1} d_{d2}), \quad (14.12)$$

где ϵ_{d1} , ϵ_{d2} и d_{d1} , d_{d2} — диэлектрические проницаемости и толщины SiO_2 и Si_3N_4 соответственно; $d_d = d_{d1} + d_{d2}$.

Напряжение пробоя МДП-конденсатора определяется электрической прочностью SiO_2 , значение критической напряженности электрического поля $E_{кр} = 6 \cdot 10^6$ В/см. Погрешность изготовления МДП-конденсатора при $C_n \gg C_d$ определяется технологическими допусками на толщину диэлектрика

$$\Delta C_d / C_d \approx -\Delta d_d / d_d. \quad (14.13)$$

Обычно погрешность близка к 20%. Температурная характеристика МДП-конденсатора определяется температурной зависимостью ϵ_d (см. п. 13.1.2).

Пример. Рассчитать удельную емкость $C_{0д}$; отношение $C'_{0\text{ min}}/C_{0д}$; пороговое напряжение U_0 ; напряжение пробоя $U_{пр}$ МДП-конденсатора со структурой, показанной на рис. 14.3. Диэлектрик — SiO_2 толщиной $d_d = 10^{-5}$ см и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_d = 3,9$. Поверхностную концентрацию донорной примеси N_{sd} примем равной 10^{19} см $^{-3}$, контактная площадка выполнена из Al, кристаллографическая ориентация кремния $\langle 111 \rangle$. Считая, что d_n [см. (14.3)] мало, положим $N_d = N_{sd} = \text{const}$.

Из соотношения (14.2) имеем $C_{0д} = 345$ пФ/мм 2 . Из (14.2) и (14.8)

$$C'_{0\text{ min}}/C_{0д} = [1 + d_{n\text{ max}} \epsilon_d / (d_d \epsilon_n)]^{-1}.$$

Согласно (14.5) и (14.9) $\Delta \varphi_F = -0,53$ В и $d_{n\text{ max}} = 1,7 \cdot 10^{-6}$ см. Тогда $C'_{0\text{ min}}/C_{0д} = 0,96$. Из (14.10) и табл. 14.2 имеем $\varphi_m = 4,3$ В и $\varphi_{\text{МДП}} \approx -0,08$ В. С учетом (14.116) и табл. 14.1 $U_0 = -58$ В (при $Q_{н.с} = 5 \cdot 10^{11}$ г), $U_{пр} = E_{кр} d_d \approx 60$ В. Из рассчитанных значений следует, что в допробойной области ($|U| < 60$ В) при $N_{sd} \geq 10^{19}$ см $^{-3}$ конденсатор обладает высокой стабильностью ($C'_{0\text{ min}}/C_{0д} = 0,96$).

§ 14.2. Проектирование МДП-транзисторов

Наибольшее распространение в ИС из МДП-транзисторов получили транзисторы с индуцированным каналом.

14.2.1. Электрические характеристики. На рис. 11.1 показана структура МДП-транзистора с p -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

$$I_c = b [(U_{з.н} - U_0) U_{с.н} - U_{с.н}^2 / 2], \quad (14.14)$$

где удельная крутизна

$$b = \epsilon_d \epsilon_0 \mu_p Z / (L d_d), \quad (14.15)$$

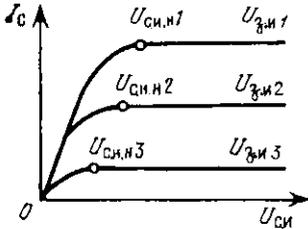
а $U_{з.н}$, $U_{с.н}$ — напряжения между затвором и истоком, сток и истоком соответственно; U_0 — пороговое напряжение; Z — ширина

канала; L — длина канала; d_d — толщина тонкого подзатворного окисла. Напряжение, соответствующее началу области насыщения (пологий участок ВАХ),

$$U_{с.и.н} = U_{з.и} - U_0. \quad (14.16)$$

При $|U_{с.и}| \geq |U_{с.и.н}|$ транзистор работает в области насыщения. Подставляя (14.16) в (14.14), получаем ВАХ

$$I_c = b(U_{з.и} - U_0)^2/2, \quad (14.17)$$



соответствующую области насыщения. Из (14.17) найдем крутизну транзистора на пологом участке

$$S = dI_c/dU_{з.и} = b(U_{з.и} - U_0), \quad (14.18a)$$

или

$$S = \sqrt{2bI_c}. \quad (14.18b)$$

Рис. 14.4. Выходные характеристики МДП-транзистора с индуцированным каналом p -типа

Дифференцируя выражение (14.14) по $U_{с.и.}$, получаем дифференциальное сопротивление транзистора на крутом участке

$$R_i = [b|U_{з.и} - U_0 - U_{с.и.}|]^{-1}, \quad (14.19)$$

а при $|U_{с.и}| \ll |U_{з.и} - U_0|$ сопротивление канала

$$R_0 = [b|U_{з.и} - U_0|]^{-1}. \quad (14.20)$$

Быстродействие МДП-транзистора определяется двумя основными параметрами: временем пролета носителей через канал $t_k = L/v_{о.с}$ (см. п. 12.1.4) 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

$$\tau_s = R_0 C_a = L^2/[\mu_p|U_{з.и} - U_0|], \quad (14.21)$$

где емкость затвора

$$C_a = \epsilon_0 \epsilon_d ZL/d_d. \quad (14.22)$$

В качестве материала затвора могут использоваться не только металлы, но и высоколегированный поликристаллический кремний. Для последнего [см. (14.10)]

$$\Phi_{МДП} = \Delta\Phi_{п.к} - \Delta\Phi_{к.к}, \quad (14.23)$$

где $\Delta\Phi_{п.к}$ и $\Delta\Phi_{к.к}$ — разности потенциалов между серединой запрещенной зоны и уровнями Ферми [см. (14.9)] для поликристаллического кремниевого затвора и полупроводниковой пластины. Меняя значения $\Delta\Phi_{п.к}$ и $\Delta\Phi_{к.к}$, можно управлять пороговым напряжением, в частности уменьшать $|U_0|$ в p -канальных транзисторах.

Пример. Рассчитать пороговые напряжения 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 окисла (SiO_2) $d_d = 10^{-5} \text{ см}$.

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 (14.5), (14.6) при $\epsilon_n = 11,7$ и $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{14} \text{ Ф/см}$ получим $Q_n = 1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Значения $Q_{n,c} = 1,44 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$ и $\varphi_{\text{МДП}} = -0,32 \text{ В}$ [см. табл. 14.1, 14.2 и (14.10)]. Тогда из (14.116) при $C_{\text{од}} = 3,45 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2$ (см. пример п. 14.1.2) $U_0 = -1,72 \text{ В}$. Для кремния *p*-типа (канал *n*-типа) с концентрацией акцепторов $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, используя те же выражения и таблицы, $\Delta\varphi_F = 0,29 \text{ В}$; $\varphi_{\text{МДП}} = -0,9 \text{ В}$; $Q_n = -1,39 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$. Пороговое напряжение $U_0 = -0,34 \text{ В}$. Аналогично можно получить пороговые напряжения для МДП-транзисторов, изготовленных на кремнии с другими концентрациями примесей. Результаты вычислений показаны на рис. 14.5. Из рисунка видно, что у *n*-канальных транзисторов при $N_n < 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ канал встро-

14.2.2. Температурная зависимость параметров. Рассмотрим температурные зависимости порогового напряжения, 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

$$n_i = 3,7 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp[-\varphi_{z0}/(2\varphi_T)], \quad (14.24)$$

где φ_{z0} — ширина запрещенной зоны при $T = \text{ОК}$. Подвижность

$$\mu = \mu_0 T_0/T, \quad (14.25)$$

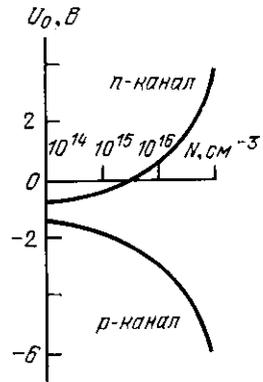


Рис. 14.5. Зависимость пороговых напряжений МДП-транзистора от концентрации примесей в полупроводниковой пластине

где μ_0 — подвижность при температуре T_0 . Изменение ширины запрещенной зоны и диэлектрической проницаемости, как показывает анализ, оказывают существенно меньшее влияние.

В температурной зависимости напряжения U_0 определяющую роль играет изменение значений $\Delta\varphi_F$ и Q_n . Используя соотношения (14.5), (14.9), (14.116) и (14.24), получаем

$$dU_0/dT = (d\Delta\varphi_F/dT) [2 + Q_n/(2C_{\text{од}}|\Delta\varphi_F|)], \quad (14.26)$$

где

$$d\Delta\varphi_F/dT = (\varphi_{z0}/2 + \Delta\varphi_F)/T. \quad (14.27)$$

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):

$$dI_c/dT = I_c [-1/T - 2(dU_0/dT)/(U_{3,н} - U_0)]. \quad (14.29)$$

Из анализа выражений (14.26), (14.27) следует, что при учете полярности напряжений $U_{з,н}$ и U_0 слагаемые в прямых скобках формулы (14.29) имеют различные знаки и при некотором напряжении $U_{з,н}$ $dI_c/dT=0$.

Пример. Рассчитать значения dU_0/dT и напряжение $U_{з,н}$, при котором $dI_c/dT=0$ для транзистора с каналом p -типа. Примем: используется кремний n -типа с кристаллографической ориентацией $\sqrt{100}$; $T=300\text{K}$; $N_d=10^{15}\text{ см}^{-3}$; толщина подзатворного окисла (SiO_2) $d_d=10^{-5}\text{ см}$.

Из примера п. 14.2.1 имеем $\Delta\varphi_F=-0,29\text{ В}$; $U_0=-1,72\text{ В}$; $Q_n=1,39\cdot 10^{-8}\text{ Кл/см}^2$, $C_{0д}=3,45\cdot 10^{-8}\text{ Ф/см}^2$. Используя соотношения (14.26), (14.27), имеем $d\Delta\varphi_F/dT=10^{-3}\text{ В/}^\circ\text{C}$ и $dU_0/dT=2,7\cdot 10^{-3}\text{ В/}^\circ\text{C}$. Из выражения (14.29) следует, что $dI_c/dT=0$ при $U_{з,н}=U_0-2TdU_0/dT=-3,3\text{ В}$.

14.2.3. Резисторы на основе МДП-транзистора. В ИС на основе МДП-транзисторов в качестве резисторов обычно используются сами МДП-транзисторы. *Спротивление слоев* диффузионных областей в p -канальных транзисторах $R_s=50\text{---}150\text{ Ом/}\square$, 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_z . Различают два случая: $|E_z-U_0|\leq |E_c|$ и $|E_z-U_0|>|E_c|$. В первом МДП-транзистор работает в пологой области ВАХ, во втором — в крутой. Используя уравнения (14.2), (14.15), (14.19), (14.20), получаем величины дифференциального сопротивления МДП-резистора (R_d): для пологого участка ВАХ

$$R_{д,п} = L/Z \mu C_{0д} |U_0| (U_{с,н} U_0 - 1)^{-1}; \quad (14.30a)$$

для крутого участка ВАХ

$$R_{д,к} = L [Z \mu C_{0д} |U_0| (U_{с,н}/U_0 + \Delta E/U_0 - 1)]^{-1}, \quad (14.30б)$$

где $\Delta E = E_z - E_c$. Для увеличения R_d значение $L/Z = 1\text{---}10$. Из (14.30) видно, что выражение (14.30б) отличается от (14.30а) сдвигом характеристики при $U_{с,н}/U_0 = 0$ на величину $\Delta E/U_0$. Из (14.30) также следует нелинейная зависимость сопротивлений от напряжения. Однако этот недостаток, если он оказывает отрицательное влияние, исправляется схемотехнически.

Пример. Рассчитать зависимости дифференциальных сопротивлений $R_{д,п}$ и $R_{д,к}$ для p -канального транзистора. Примем: $\mu_p = 200\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; $U_0 = -2,5\text{ В}$; $C_{0д} = 3,45\cdot 10^{-8}\text{ Ф/см}^2$ ($d_d = 10^{-5}\text{ см}$); $L/Z = 1$, а $\Delta E/U_0 = 0; 1,5$.
Из (14.30 а) имеем (при $\Delta E/U_0 = 0$)

$$R_{д,п} = 58 (U_{с,н}/U_0 - 1)^{-1} \text{ кОм},$$

а из (14.30 б) (при $\Delta E/U_0 = 1,5$)

$$R_{д,к} = 58 (U_{с,н}/U_0 + 0,5)^{-1} \text{ кОм}.$$

§ 14.3. Проектирование межэлементных соединений

В табл. 14.4 представлены относительные удельные сопротивления некоторых металлов.

Таблица 14.4. Относительные удельные сопротивления металлов

Металл	Cu	Ag	Au	Al	Cr	W	Ni	Pt	Ta
ρ_{Me}/ρ_{Cu}	1	0,94	1,3	1,6	1,8	3,2	4,1	5,9	10

Примечание. ρ_{Me} и ρ_{Cu} — удельные сопротивления металла и меди соответственно ($\rho_{Cu} = 1,7 \cdot 10^{-6}$ Ом·см).

Обычно в полупроводниковых ИС 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, защищенным слоем SiO_2 (рис. 14.6, а), и проводящие диффузионные перемычки под слоем двуокиси кремния (рис. 14.6, б).

14.3.1. Шины металлизации. Минимальная ширина металлизированной дорожки (при заданной ее толщине) определяется допустимой плотностью тока $(2,0-2,5) \cdot 10^5$ А/см². Металлизированные дорожки вносят паразитные элементы: сопротивления, емкости и индуктивности. Рассмотрим их подробнее.

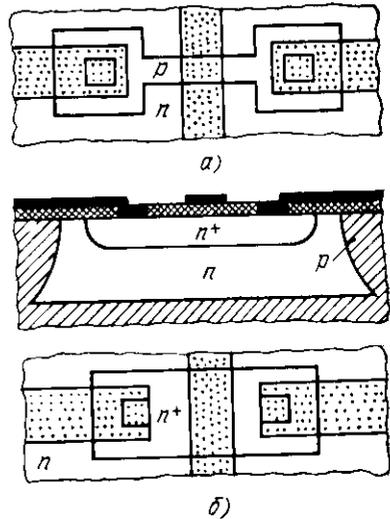


Рис. 14.6. Прокладка шин металлизации над каналом резистора (а) и через n^+ -перемычку (б)

Активные потери определяются омическим сопротивлением металлизированных шин и вихревыми токами, возникающими в полупроводнике при протекании через металлизированные шины переменного тока. 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 Al приблизительно в 2,5—3 раза превышает значение, получаемое из удельного сопротивления Al ($\rho = 2,9 \cdot 10^{-6}$ Ом·см). На высоких частотах глубина проникновения магнитного поля, т. е. толщина скин-слоя,

$$d_c = \sqrt{\rho / (\pi f \mu_0 \mu_n)}, \quad (14.31)$$

где ρ — удельное сопротивление полупроводника; f — рабочая частота; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; $\mu_n \approx 1$ — относитель-

ная магнитная проницаемость полупроводника. На частотах порядка десятков мегагерц толщина скин-слоя существенно превышает толщину полупроводниковой пластины. Поэтому активные потери, определяемые вихревыми токами (R_b), на единицу длины металлизированной дорожки с учетом (14.31) равны

$$R_b/l = A \rho / (b^2 d_c^2) = \pi f \mu_0 A / b^2, \quad (14.32)$$

где b — ширина шины; $A \approx b d_n$ (d_n — толщина полупроводниковой пластины).

Паразитная емкость металлизированной дорожки (C_n), отнесенная к ее длине, определяется с помощью соотношения (14.2) и составляет

$$C_n/l = \epsilon_d \epsilon_0 b / d_d. \quad (14.33)$$

Паразитная индуктивность (L_n) на единицу длины

$$L_n/l \approx (\mu_0/2) \{b/(2d_d) + (1/\pi) \ln [2\pi e (b/d_d + 0,94)]\}^{-1}, \quad (14.34a)$$

где e — основание натурального логарифма. Соотношение (14.34a) дает несколько заниженную индуктивность, так как оно справедливо при удельном сопротивлении полупроводника, близком к удельному сопротивлению металла. При реальных значениях величин в соотношении (14.32a) можно пренебречь членом, содержащим логарифм. Тогда

$$L_n/l \approx \mu_0 d_d / b. \quad (14.34b)$$

Как следует из анализа соотношений (14.31) — (14.34), влияние вихревых токов необходимо учитывать при частотах, больших 20—30 МГц. Паразитную емкость необходимо учитывать на любых частотах. Роль паразитной индуктивности обычно мала.

Пример. Рассчитать минимальную ширину металлизированной дорожки b при максимальном токе $I=30$ мА и толщине металлизации $d_m=1,5$ мкм. Для найденного значения b определить также значения паразитных параметров (R_n , R_b , C_n , L_n), отнесенные к единице длины, и сопротивления паразитных элементов на частоте $f=100$ МГц. Толщину полупроводниковой пластины примем равной 250 мкм; $d_d=0,5$ мкм; $\epsilon_d=3,9$.

Допустимая плотность тока через металлизированную дорожку $j_d=2 \cdot 10^5$ А/см², тогда $b=I/(j_d d_m)=10$ мкм. Активное паразитное сопротивление металлизированной дорожки (R_n) при $R_s=0,05$ Ом/□ и сопротивление, связанное со скин-эффектом [см. (14.32)], составит: $R_n/l=50$ Ом/см и $R_b/l=100$ Ом/см. Значение $C_n/l=6,9$ пФ/см [см. (14.33)], а соответствующее сопротивление $1/(\omega C_n)=230$ Ом/см. Паразитная индуктивность [см. (14.34a)] $L_n/l=0,53$ пГн/см, соответствующее паразитное индуктивное сопротивление $\omega L_n/l \approx 0,3$ Ом/см.

14.3.2. Многослойная металлизация. При многослойной металлизации первый металлический слой в ИС 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 тре-

буемой изоляции и исключения пор составляет 0,5 мкм. В настоящее время широко используются 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 (14.31) — (14.34). При применении в качестве межслойного диэлектрика не SiO_2 в соотношении (14.33) необходимо заменить ϵ_d на $\epsilon_{d,\text{эф}}$ [см. (14.12) и п. 14.1.2].

Влияние паразитных параметров R_B и C_n можно характеризовать частотой f_0 , на которой амплитуда сигнала, передаваемого по шине металлизации, ослабляется до 0,7 исходного значения. Используя (14.32), (14.33) с учетом выражения $f_0 = 1/(\pi R_B C_n)$ (см. п. 13.2.5), получаем

$$f_0 = [1/(\pi l)] \sqrt{d_d / (\epsilon_{d,\text{эф}} \epsilon_0 \mu_n \mu_0)}. \quad (14.35)$$

Для оценки значения f_0 при однослойной металлизации в соотношении (14.35) $\epsilon_{d,\text{эф}}$ заменяется на ϵ_d .

Пример. Рассчитать для двухслойной металлизации C_n/l и f_0 . Для первого слоя диэлектрика (SiO_2) примем $d_{d1} = 0,5$ мкм; $\epsilon_{d1} = 3,9$, для второго слоя (SiO) $d_{d2} = 1$ мкм; $\epsilon_{d2} = 6$; ширина металлизированной дорожки $b = 10$ мкм при длине l см; толщина пластины $d_n = 250$ мкм.

Из выражения (14.12) имеем $\epsilon_{d,\text{эф}} = 5,1$. Из (14.33) и (14.35) $C_n/l = 3$ пФ/см и $f_0 \approx 330$ МГц.

14.3.3. Диффузионные перемычки. Такие перемычки позволяют обойтись без двухслойной металлизации при необходимости исключить пересечения проводников.

На рис. 14.6,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 p -область. Последняя характеризуется большим удельным сопротивлением слоя, чем удельное сопротивление слоя n^+ -перемычки. Следовательно, сопротивление перемычки в ИС на p -канальных МДП-транзисторах существенно больше, чем в ИС на n -канальных МДП-транзисторах. В ИС на биполярных транзисторах для перемычки используется n^+ -слой, расположенный в отдельной изолированной области. Площадь, занимаемая перемычкой, приблизительно равна площади транзистора с минимальными геометрическими размерами. Вносимое сопротивление 5—15 Ом в зависимости от геометрических размеров перемычки.

Конструирование полупроводниковых интегральных микросхем

§ 15.1. Разработка топологии полупроводниковых интегральных микросхем

Наиболее важной стадией разработки (проектирования) полупроводниковых ИС 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 топологических требований и ограничений. Разработка топологии носит индивидуальный творческий 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 ИС. Рассмотрим каждый из этих этапов.

1. 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 сопротивлений. 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 накладывалось); тип корпуса; минимальные геометрические размеры элементов и разброс номиналов элементов; параметры технологических режимов (поверхностные концентрации, глубины залегания $p-n$ -переходов, толщины диэлектрических пленок) и их разброс.

2. Расчет геометрических размеров активных и пассивных эле-

ментов. На этом этапе руководствуются электрическими, конструктивными и технологическими данными. Допускается использование ранее разработанных элементов для других ИС, если элементы имеют параметры, соответствующие электрическим требованиям, и предполагают использование того же технологического процесса, что и в проектируемой полупроводниковой ИС.

Если базовый технологический процесс не обеспечивает заданных требований к активным и пассивным элементам, то его корректируют.

3. 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 необходимого числа изолированных областей, минимизация возможного числа пересечений коммутационных шин элементов и длины шин. При определении необходимого числа изолированных областей следует предусматривать закрытое состояние p - n -переходов, образующих резисторы* и конденсаторы (последние редко используются в полупроводниковых ИС, поэтому в дальнейшем будем учитывать только резисторы). Кроме того, следует учитывать следующие соображения: все транзисторы, имеющие различные потенциалы коллекторов, должны быть изолированы; все резисторы могут быть размещены в одной изолированной области, имеющей максимальный потенциал в схеме; резисторы, включенные в эмиттерные цепи транзисторов, можно объединить с последними в одну изолированную область; на p -область изолирующего перехода должен быть подан минимальный потенциал. Для улучшения развязки между коллекторными изолированными областями транзисторов контакт к p -области целесообразно делать рядом с наиболее мощным транзистором.

В некоторых типах ИС, в частности в микросхемах памяти, имеется большое число повторяющихся групп элементов (запоминающие ячейки). Рекомендуется начинать разработку с отдельной группы, а затем, объединять их в один эскиз. Внешние контактные площадки, вынесенные на края кристалла из-за их 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 закорачивания контактных площадок при дефекте в окисле.

Окончательный эскиз топологии согласуется топологом с разработчиком схемы для выяснения возможности изменения порядка расположения внешних контактных площадок, использования n^+ -перемычек** и изменения геометрии транзисторов для проклад-

* Это в первую очередь относится к наиболее широко распространенным резисторам на основе базового слоя n - p - n -транзистора.

** Использование n^+ -перемычек недопустимо в шинах питания и земли, так как приводит к смещению всех уровней напряжений в схеме и может привести к неработоспособности последней.

ки межсоединений (удаление контакта к коллектору от коллекторного $p-n$ -перехода и др.). Обычно прорабатывается несколько вариантов эскиза топологии.

4. 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, кратном 100. Обычно топология проектируется в прямоугольной системе координат и состоит из замкнутых фигур, стороны которых состоят из отрезков прямых линий, параллельных осям 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 происходят 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 конце концов, выбирают оптимальный предварительный вариант топологии.

5. 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 ИС: увеличить расстояния между внешними контактными площадками; ширину межэлементных соединений и расстояние между ними; спрямить шины металлизации, границы изолирующих областей.

Заключительной стадией являются контрольно-проверочные расчеты топологии ИС, включающие выявление топологических ошибок (правильность коммутации элементов, оценку теплового режима, паразитных элементов и связей). Исходя из окончательного варианта топологии, выполняют послойные чертежи для изготовления фотомасок.

Спроектированная топология должна: удовлетворять всем предъявляемым электрическим, конструктивным и технологическим требованиям и ограничениям; обеспечивать возможность экспериментальной проверки электрических параметров элементов или отдельных субблоков 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 ИС. При положительных оценках конструкции переходят к разработке документации на ИС.

В отличие от биполярных ИС, главная особенность ИС на МДП-транзисторах с каналами одного типа проводимости заключается в отсутствии изолирующих областей. Это связано с тем, что в схемах на транзисторах с каналами одного типа проводимости 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. Схемы МДП могут изготавливаться на односторонних пластинах, а не на эпитаксиальных (как биполярные ИС). Обычно кристаллы МДП ИС 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 ИС, чем в биполярных ИС.

Указанных достоинств лишены ИС на комплементарных МДП-транзисторах (КМДП). У них требуется создавать на пластине диффузионные области с типом проводимости, противоположным типу проводимости основной пластины. Это приводит к тому, что плотность компоновки КМДП ИС близка к плотности компоновки биполярных ИС.

Для практической разработки топологии биполярных ИС достаточно сведений данного параграфа и формул и примеров гл. 12, 13.

В МДП ИС более отчетливо проявляется связь топологии МДП-транзисторов с их электрическими характеристиками. Поэтому в § 15.2, 15.3 основное внимание будет уделено практической разработке топологии МДП ИС.

Используемые для конструктивного оформления ИС корпуса рассмотрены в пп. 7.3.3 и 8.6.3. В табл. П.3 представлены размеры подложек или кристаллов ИС (в том числе полупроводниковых) для размещения в стандартных корпусах.

§ 15.2. Разработка топологии цифровых интегральных микросхем на МДП-транзисторах с каналами одного типа проводимости

Основой построения цифровых ИС на МДП-транзисторах являются инверторы. Поэтому анализ характеристик последних и разработка их топологии носят общий характер.

Обычно в инверторах в качестве нагрузочного резистора используется МДП-транзистор. На рис. 15.1,а представлена электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного

типа проводимости^{*)}: T_n — нагрузочный транзистор, выполняющий функции резистора; T_a — активный транзистор. В инверторах обычно $E_3 = E_c$ либо $E_3 - U_0 > E_c$ (см. п. 14.2.3). При $E_3 = E_c$ максимальное выходное напряжение равно $E_c - U_0$, так как T_a закрыт, а T_n всегда работает на пологом участке характеристики и через

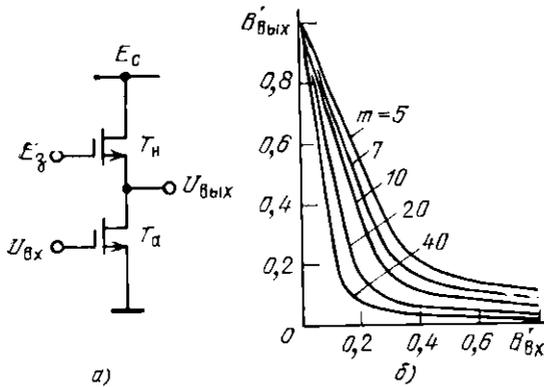


Рис. 15.1. Электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах (а) и его нормированная передаточная характеристика (б)

него течет обратный ток транзистора T_a . При $E_3 - U_0 > E_c$ транзистор T_n работает в крутой области ВАХ и максимальное выходное напряжение равно E_c . Обеспечение малого выходного напряжения, соответствующего лог. 0 (на входе высокое напряжение, соответствующее лог. 1), требует, чтобы в открытом состоянии сопротивление T_n было существенно больше сопротивления T_a , т. е. $b_a \gg b_n$.

Если $E_3 = E_c$ (транзистор T_n работает на пологом участке ВАХ), передаточную характеристику инвертора разобьем на две области: $U_{\text{вых}} \geq U_{\text{вх}} - U_0$ и $U_{\text{вых}} < U_{\text{вх}} - U_0$. В первой области оба транзистора работают на пологом участке ВАХ. Используя соотношение (14.17), с учетом равенства токов транзисторов T_n и T_a получаем

$$b_a (U_{\text{вх}} - U_0)^2 / 2 = b_n (E_c - U_{\text{вых}} - U_0)^2 / 2. \quad (15.1a)$$

Обозначив

$$b_a / b_n = Z_a L_n / (Z_n L_a) = m \quad (15.16)$$

и введя нормированные значения

$$U_{\text{вых}} / (E_c - U_0) = B'_{\text{вых}} \quad \text{и} \quad (U_{\text{вх}} - U_0) / (E_c - U_0) = B'_{\text{вх}},$$

представим (15.1a) в виде

$$B'_{\text{вых}} = 1 - B'_{\text{вх}} \sqrt{m}. \quad (15.1в)$$

Во второй области на пологом участке ВАХ работает только тран-

^{*)} Будем рассматривать n -канальные МДП-транзисторы.

зистор T_n . Используя (14.14), (14.17) и учитывая равенство токов, имеем

$$b_n [(U_{вх} - U_0) U_{вых} - U_{вых}^2/2] = b_n (E_c - U_{вых} - U_0)^2/2. \quad (15.2a)$$

Введя $B'_{вых}$ и $B'_{вх}$, получим

$$B'_{вых} = [1 + m B'_{вх} - \sqrt{(1 + m B'_{вх})^2 - 1 - m}]/(1 + m). \quad (15.26)$$

На рис. 15.1,б представлены кривые, соответствующие соотношениям (15.1в) и (15.26). Из рисунка видно, что для уменьшения выходного напряжения необходимо увеличивать m . При заданном значении $B'_{вх}$ требуемое значение $B'_{вых}$, соответствующее лог.0 ($B'_{вых}$ минимально), обеспечивается выбором m . Обычно $m = 10 - 40$. Вариант, когда $E_3 = E_c$, имеет наибольшее распространение.

Если же $E_3 - U_0 > E_c$ (при этом T_n всегда работает в крутой области ВАХ), можно получить выражения, аналогичные (15.1) и (15.2).

При $U_{вых} \geq U_{вх} - U_0$

$$(1 - B''_{вых})(1 - KB''_{вых}) = mKB''_{вх}. \quad (15.3a)$$

При $U_{вых} < U_{вх} - U_0$

$$(1 - B''_{вых})(1 - KB''_{вых}) = mK[B''_{вых}(2B''_{вх} - B''_{вых})], \quad (15.36)$$

где $B''_{вых} = U_{вых}/E_c$; $B''_{вх} = (U_{вх} - U_0)/E_c$; $K = E_c/[2(E_3 - U_0) - E_c]$.

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 $U_{вых} \approx 0$ и T_n — на пологом участке [см. (14.17)], имеем

$$P = b_n E_c (E_c - U_0)^2/2. \quad (15.4a)$$

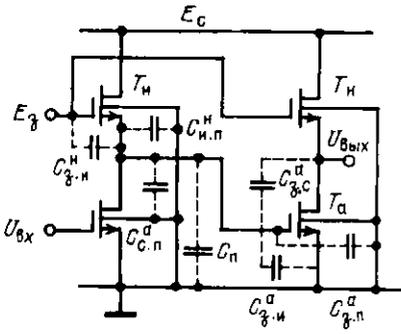
Для получения средней мощности выражение (15.4a) разделим на 2:

$$\bar{P} = b_n E_c (E_c - U_0)^2/4. \quad (15.46)$$

Быстродействие инвертора обусловлено в основном временем перезаряда суммарной емкости C_c , подключенной к стоку активного или истоку нагрузочного транзисторов (рис. 15.1,а). Величина C_c определяется из рис. 15.2 в предположении, что инвертор нагружен на аналогичный инвертор. Из рисунка следует, что

$$C_c \approx C_{з.н}^n + C_{н.п}^n + C_{с.п}^a + C_{п} + C_{з.и}^a + C_{з.п}^a + \xi C_{з.с}^a, \quad (15.5)$$

где $C_{з.н}^n$, $C_{н.п}^n$ — емкости затвор—исток и исток—подложка нагрузочного транзистора; $C_{с.п}^a$, $C_{з.и}^a$, $C_{з.п}^a$, $C_{з.с}^a$ — емкости сток—подложка, затвор—исток, затвор—подложка, затвор—сток активного транзистора; $C_{п}$ — паразитная емкость монтажных соединений; $\xi \approx \sqrt{m+1}$ — коэффициент, связанный с эффектом Миллера и имеющий величину порядка единиц. Емкости $C_{н.п}^n$, $C_{с.п}^a$ — барьерные емкости переходов; $C_{з.и}^a$ — МДП-емкость; $C_{з.и}^n$, $C_{з.п}^a$, $C_{з.с}^a$ —



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 емко-

Рис. 15.2. Электрическая схема инвертора на МДП-транзисторах нагруженного на аналогичный инвертор

сти C_c при изменении транзистором T_n напряжения $U_{\text{вых}}$ от 0 до $E_c - U_0$. Длительность фронта или задержку переключения ($t_{зд}$) запишем как

$$t_{зд} \approx 18 C_c / [b_n (E_c - U_0)]. \quad (15.6)$$

Работа переключения ($\bar{t}_{зд} = t_{зд}/2$)

$$\bar{P} \bar{t}_{зд} \approx 2,3 E_c C_c (E_c - U_0). \quad (15.7)$$

Как видно из (15.7), для уменьшения $\bar{P} \bar{t}_{зд}$ необходимо уменьшить емкость C_c и напряжение питания (что эквивалентно уменьшению порогового напряжения), т. е. уменьшать геометрические размеры транзистора и, что немаловажно, емкость $C_{з,с}$, которая увеличена в ξ раз. Для уменьшения $C_{з,с}$ 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:

$$L_{\text{min}} \geq \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_n |U_{с.н} - U_{с.в.н}| / (qN)}. \quad (15.8a)$$

Для инвертора при максимальной ширине слоя пространственного заряда

$$L_{\text{min}} \geq \sqrt{2 \epsilon_0 \epsilon_n |U_0| / (qN)}. \quad (15.8b)$$

Значение L_{min} , как видно из (15.8б), зависит от концентрации примесей в полупроводниковой пластине N и порогового напряжения U_0 . Минимальная длина канала по фотошаблону $L_{\text{min} \phi} = L_{\text{min}} + 2d$, где d — глубина залегания истокового и стокового переходов; $L_{\text{min}} \geq 3-5$ 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 $Z_n \ll L_n$ и $Z_a \gg L_a$, из (15.1б)

$$\Delta m / m \approx \Delta Z_n / Z_n + \Delta L_a / L_a. \quad (15.10)$$

Как следует из (15.9),

$$\Delta B'_{\text{вых}}/B'_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}} = -\Delta m B'_{\text{вх}}/(1 + m B'_{\text{вх}}). \quad (15.11a)$$

Полагая $m B'_{\text{вх}} \gg 1$ ($B'_{\text{вых}} \ll 1$), с учетом (15.10) получаем в наилучшем случае

$$|\Delta U_{\text{вых}}|/U_{\text{вых}} = |\Delta m|/m \approx |\Delta Z_{\text{н}}|/Z_{\text{н}} + |\Delta L_{\text{а}}|/L_{\text{а}}. \quad (15.116)$$

Из (15.116) имеем

$$Z_{\text{н}} = |\Delta Z_{\text{н}}|/(|\Delta U_{\text{вых}}|/U_{\text{вых}} - |\Delta L_{\text{а}}|/L_{\text{а}}). \quad (15.12)$$

Выражение (15.12) можно получить и из (15.36) при $E_3 - U_0 > E_c$. При заданных величинах $|\Delta U_{\text{вых}}|/U_{\text{вых}}$, $L_{\text{а min}}$, $\Delta Z_{\text{н}}$ и $\Delta L_{\text{а}}$ находится $Z_{\text{н min}}$. Соотношения (14.2), (14.15), (15.16), (15.4), (15.12) позволяют определить геометрические размеры инвертора.

На рис. 15.3 приведена топология инвертора на транзисторах одного типа проводимости при $E_3 \neq E_c$. Непрерывными линиями показаны границы диффузионных областей истока и стока; штриховыми — границы тонкого окисла. При $E_3 = E_c$ соответствующие шины объединяются. Как видно из рисунка, сток $T_{\text{а}}$ и исток $T_{\text{н}}$ объединены в одну область. Потенциал полупроводниковой пластины устанавливается равным потенциалу земли созданием омического контакта с основанием корпуса и соответствующим соединением электрода последнего с областью истока транзистора.

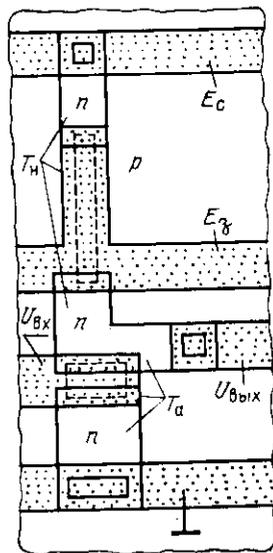


Рис. 15.3. Топология инвертора на МДП-транзисторах с каналами одного типа проводимости

Пример. Разработать топологию инвертора при $E_3 = E_c$ (на МДП-транзисторах с n -каналом), нагруженного на аналогичный инвертор. Пусть $E_3 = E_c = 7,5$ В; $U_0 = 2,5$ В; $U_{\text{вых min}} = 0,25$ В; $|\Delta U_{\text{вых min}}|/U_{\text{вых min}} = 0,5$; $P = 0,25$ мВт; отклонение линейных размеров от номинала $\pm 0,4$ мкм; $L_{\text{а min}} = 3$ 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 $d = 2$ мкм; перекрытие тонким окислом областей стока и истока 2 мкм; удельная барьерная емкость переходов $C_0 = 150$ пФ/мм², диэлектрика $C_{\text{ок}} = 345$ пФ/мм²; $\mu_n = 800$ см²/(В·с).

Из соотношения (15.46) получим

$$b_{\text{н}} = 4 \bar{P}/[E_c(E_c - U_0)^2] \approx 0,005 \text{ мА/В}^2.$$

При $U_{\text{вх}} = E_c - U_0 = 5$ В значение $B'_{\text{вх}} = 0,5$. Из рис. 15.1, б для обеспечения $U_{\text{вых}} = 0,25$ В [$B'_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}/(E_c - U_0) = 0,05$] $m = 20$. Для определения m можно было воспользоваться соотношением (15.9); $b_{\text{а}} = m b_{\text{н}} = 0,1$ мА/В². Примем $L_{\text{а}} = L_{\text{а min}} = 3$ мкм. Тогда из (14.2) и (14.15) $Z_{\text{а}}/L_{\text{а}} = b_{\text{а}}/(\mu_n C_{\text{ок}}) \approx 3,6$ и $Z_{\text{а}} \approx 11$ мкм. С помощью (15.12) при $|\Delta Z_{\text{н}}| = |\Delta L_{\text{а}}| = 0,8$ мкм $Z_{\text{н}} = 4$ мкм; $L_{\text{н}} = Z_{\text{н}} m / (Z_{\text{а}}/L_{\text{а}}) \approx 22$ мкм; $\xi \approx \sqrt{m+1} = 5,5$.

Руководствуясь технологическими ограничениями, сформулированными выше, и топологией инвертора, показанной на рис. 15.3, получим площади: $A_{a,n} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; $A_{a,c} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; площади канала затвора $A_{z,n} = 0,33 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; $A_{z,c} = 0,88 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; площади перекрытия подзатворным окислом областей истока и стока $A_{a,n}^* = A_{a,c}^* = 0,22 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; $A_{z,n}^* = A_{z,c}^* = 0,08 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$; площадь общей области транзисторов $A_c^* = A_{n,c}^* = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2$. Длина металлической шины, соединяющей выход инвертора со входом нагрузочного инвертора, $l_m = 0,08 \text{ мм}$.

Используя площади, получаем: емкости областей истока и стока $C_{a,n} = 0,070 \text{ пФ}$; $C_{a,c} = 0,039 \text{ пФ}$; емкости затвора $C_{z,n} = 0,011 \text{ пФ}$; $C_{z,c} = 0,030 \text{ пФ}$; емкости затвор — исток, затвор — сток $C_{z,n}^* = C_{z,c}^* = 0,008 \text{ пФ}$; $C_{a,n}^* = C_{a,c}^* = 0,003 \text{ пФ}$; емкость общей области транзисторов $C_{c,n} = C_{c,p} = 0,077 \text{ пФ}$. Емкость соединительной шины $C_m = 0,055 \text{ пФ}$ (см. пример п. 14.3.1). Используя (15.5) и $\xi = 5,5$, имеем $C_c \approx 0,2 \text{ пФ}$. Воспользовавшись (15.6), получим $t_{зд} \approx 70 \text{ пс}$. При расчете геометрических размеров транзисторов инвертора для нахождения b_n можно было исходить из заданного $t_{зд}$.

§ 15.3. Особенности проектирования топологии аналоговых интегральных микросхем с дифференциальным каскадом на входе

Разработка топологии аналоговых ИС имеет определенную специфику по сравнению с разработкой топологии цифровых ИС. Это связано с особой чувствительностью аналоговых схем к разбросу параметров элементов, к их температурному и временному дрейфу, а также к шумам и наводкам. Сказанное в первую очередь относится к аналоговым схемам с дифференциальным каскадом на входе. В аналоговых ИС с дифференциальным каскадом на входе выходной каскад обычно мощный. Выходной каскад является сосредоточенным источником выделения тепла, что может привести к значительному температурному градиенту на полупроводниковом кристалле. 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 одинаковых геометрических размеров, но и одинаково ориентировать в плоскости кристалла и располагать на одних изотермальных контурах, чаще всего на равных расстояниях от источника выделения тепла. Как правило, мощные выходные каскады располагаются на краю полупроводникового кристалла и их локальный нагрев приводит к образованию изотермальных 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 дифференциального каскада на МДП-транзисторах может быть достигнута во «вложенной» структуре, показанной на рис. 15.4, использование которой позволяет объединить истоковые области (И). Области затворов (З1, З2) и стоков (С1, С2) выполняются раздельно. Одинаковая форма стоковых и

затворных областей и их близкое расположение друг к другу позволяют получить идентичные характеристики обоих транзисторов.

В линейных ИС возникает паразитная связь между выходом и входом по полупроводниковой пластине. Для минимизации паразитной связи при разработке топологии ИС целесообразно предусмотреть два контакта к пластине: один вблизи входного, другой — вблизи выходного каскада.

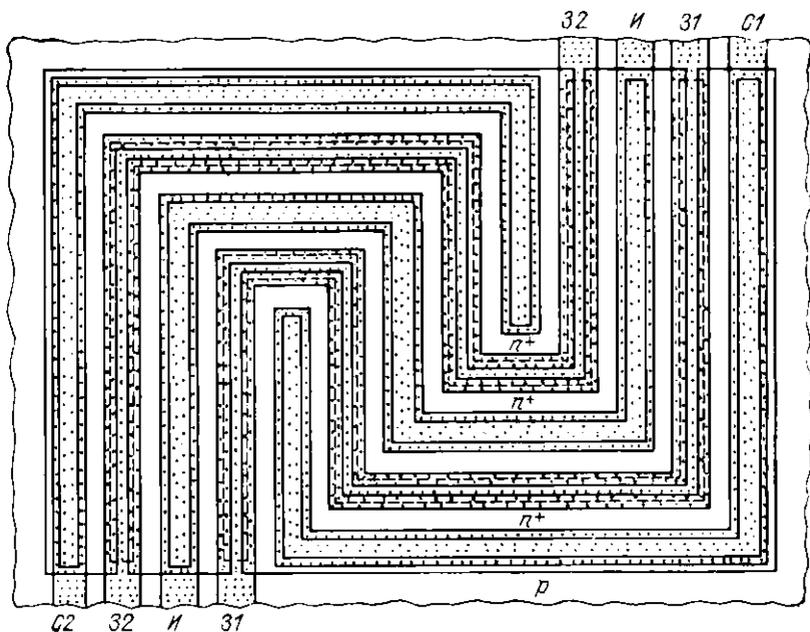


Рис. 15.4. Топология МДП-транзисторов дифференциального каскада с «вложенной» структурой

§ 15.4. Документация на интегральные микросхемы

Для стандартизации параметров электрических схем, их топологического и конструктивного оформления, определения требований к технологии изготовления ИС используется комплект документации.

15.4.1. Технические условия. Технические условия (ТУ) на ИС 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 ИС опытного или массового производства, изготавливаемых отечественной промышленностью, устанавливают ОТУ. Назначение каждого типа ИС определяют ЧТУ. Они также уточняют нормы на параметры и режимы испытаний, устанавливают специальные и дополнительные требования. Для определения параметров ИС 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 ИС.

Требования к электрическим параметрам и режимам. Электрические параметры ИС при изготовлении, хранении и эксплуатации в режимах и условиях, допускаемых в технической документации на ИС конкретных типов, должны соответствовать нормам, установленным в ЧТУ. В соответствии с ГОСТом предпочтительными являются следующие значения напряжений питания ИС, В: 1,2; 2,4; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 9,0; 12,0; 15,0; 24; 27; 30; 48.

Требования к конструкции. Интегральные микросхемы должны иметь габаритные размеры, внешний вид и массу, соответствующие нормам, установленным в технической документации. Корпусные ИС должны быть герметичными. Выводы ИС 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 ИС механических нагрузок (вибрационных, многократных ударов и центробежных), климатических воздействий (диапазон температур, циклические изменения температуры в диапазоне, повышенная влажность и др.), оговоренных в технической документации, ИС должны сохранять прочность конструкции и электрические параметры в пределах, оговоренных в ЧТУ. Интегральные микросхемы должны также удовлетворять требованиям к надежности, долговечности, сохраняемости и др.

15.4.2. Конструкторская документация. В состав конструкторской документации (КД) входят основной комплект документов и вспомогательные комплекты документов на составные части ИС (корпус, инструкции по эксплуатации, паспорт ИС и др.). Основным комплект КД состоит из функциональной и принципиальной схем, топологических сборочного и послыйных 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 последова-

Таблица 15.1. Пример оформления перечня элементов и компонентов

Позиционное обозначение	Обозначение	Наименование	Число	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	

тельности расположения их условных графических изображений. Обычно нумерация производится сверху вниз и слева направо. Все элементы и компоненты ГИС 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 ГИС в графе ставится прочерк. В графе «Наименование» приводят наименование элемента или компонента, его номинал и допуск (для пассивных элементов). Для пассивных элементов указывают также 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 ИС перечень элементов не составляется. Расчетные номиналы, допуски, а также другие данные указываются рядом с условным обозначением элемента или на поле чертежа.

Топологические чертежи носят названия «Плата» для ГИС или «Кристалл» для полупроводниковых ИС. На первом листе чертежа изображается подложка со всеми слоями (сборочный чертеж), а на остальных — послойные чертежи. На поле сборочного чертежа помещают характеристические таблицы для ГИС (табл. 15.2) и полупроводниковых ИС (табл. 15.3). В графах табл. 15.2 ис-

Таблица 15.2. Пример оформления характеристической таблицы для ГИС

Номер слоя	Условное обозначение	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

пользуются следующие данные: 2 — условное обозначение слоя на чертеже (различного вида штриховка); 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 полупроводниковых ИС

Номер слоя	Наименование элементов структуры	Толщина, мкм	Тип проводимости	Материал слоя		Сопротивление слоя, Ом/□	Толщина окисных слоев над структурой, мкм	Номер листа чертежа
				Наименование	ГОСТ, Ту			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	Эмиттерный слой	1,5	<i>n</i> +	Трихлорид фосфора	ГОСТ	2	0,4	4
5	Контактные площадки и проводники	1,5	—	Алюминий	ГОСТ	Не более 0,05	—	6

На полях послойных 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 координаты

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

наты, 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.

На сборочном чертеже ИС 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 ИС имеет точность совмещения фотошаблонов, в связи с этим на топологических чертежах размещаются метки совмещения.

*) Для БИС такие таблицы обычно не составляются (см. п. 17.7.2).

15.4.3. 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 толстопленочных ГИС конструктивной основой, на которой располагаются элементы и компоненты, являются диэлектрические подложки, основные характеристики которых рассмотрены в § 8.2. 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 ГИС и микросборок. В тонкопленочных ГИС элементы располагаются только с одной стороны подложки, а в толстопленочных ГИС могут использоваться обе ее стороны.

Один из вариантов тонкопленочной технологии — танталовая — уникален в том смысле, что тантал (Ta) является исходным материалом для получения и резистивных, и диэлектрических, и проводящих слоев. Однако относительно большое сопротивление слоя Ta при применении его в качестве проводника сдерживает использование полностью танталовых элементов ГИС. Основные материалы для изготовления пассивных элементов ГИС и их характеристики рассмотрены в § 8.3.

16.1.1. 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 величиной перекрытия резистивного слоя h для ликвидации влияния возможного несовмещения слоев. Со-

противление 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; $K_\Phi = R/R_s$ — коэффициент формы резистора*).

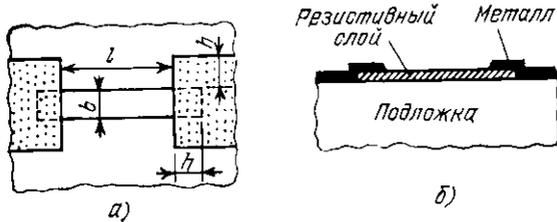


Рис. 16.1. Топология (а) и структура (б) тонкопленочного резистора с прямоугольной геометрией

На рис. 16.2 показаны резисторы более сложной конфигурации с $50 \geq K_\Phi \geq 10$, имеющие форму типа «меандр» (а) и «змейки» (б). Их сопротивление

$$R = R_s (l_\Sigma/b + nK_{\text{изл} 1,2}), \quad (16.2)$$

где l_Σ — суммарная длина прямолинейных участков резистора; n — число изломов или четвертей кольца***) и $K_{\text{изл}}$ — эквивалент-

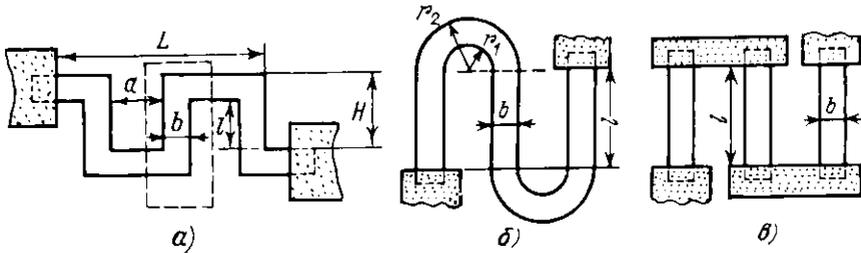


Рис. 16.2. Пленочные резисторы больших номиналов: а — меандр; б — змейка; в — полосковый

ное число квадратов, определяющее сопротивление области излома (квадрата со стороной b или четверти кольца). Для резистора на рис. 16.2,а

$$K_{\text{изл} 1} = 0,55, \quad (16.3a)$$

на рис. 16.2,б

$$K_{\text{изл} 2} = 1,57/\ln(r_2/r_1). \quad (16.3б)$$

*) В соотношении (16.1) не учтено влияние контактного сопротивления. Учет последнего производится в п. 16.1.4.

**) Для рис. 16.2, а $l_\Sigma = 3l + 2a$ и $n = 4$, а для рис. 16.2, б $l_\Sigma = 3l$ и $n = 4$.

На рис. 16.2,а 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], то занимаемая им площадь

$$A_m = K_\Phi b(a + b) + L [2b(1 - K_{изл}) - a]. \quad (16.4a)$$

В большинстве случаев в (16.4a) 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 имеет приблизительно постоянную величину, не зависящую 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 неконтактного трафарета (см. § 8.4), целесообразно использовать конфигурацию, показанную на рис. 16.2,в. Если резистор рассеивает большую мощность, то его следует расщепить на несколько параллельно соединенных резистивных полосок, 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 обеих сторон (см. рис. 16.2), а не с одной. В последнем случае на сопротивление резистора окажет влияние смещение контактных площадок.

Расчет геометрических размеров пленочных резисторов проводится аналогично соответствующему расчету полупроводниковых резисторов (см. п. 13.2.2). Соотношение (13.11б), хотя и применяется в большинстве случаев, определяет ориентировочное значение ширины резистора. Оно не учитывает всех конкретных условий, определяющих теплоотдачу. Остановимся лишь 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 уравниванием длин резисторов 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

$$R_s = \left[\sum_{i=1}^N R_i / \sum_{i=1}^N (1/R_i) \right]^{1/2}. \quad (16.5)$$

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 (см. рис. 16.1, 16.2).

3. Выражение (13.13) для определения относительной погрешности изготовления резистора (точностной величины b_τ) можно дополнить температурным коэффициентом сопротивления. Тогда при $l \gg b_\tau$ результирующая погрешность проектируемого резистора

$$\pm \Delta R/R \approx \pm 2 \Delta b_\tau/b_\tau \pm \Delta R_s/R_s + \Delta T \cdot \text{ТКС}, \quad (16.6)$$

где ΔT — рабочий диапазон температур^{*}. Из (16.6) получим

$$b_\tau = \pm 2 \Delta b_\tau (\pm \Delta R/R \mp \Delta R_s/R_s - \Delta T \cdot \text{ТКС})^{-1}. \quad (16.7)$$

Данные, необходимые для расчета геометрии резистора, можно получить из табл. 8.2. Обычно $|\Delta R_s|/R_s \leq 0,05$.

При $b < l_\Sigma$ 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_Σ . При $b > l_\Sigma$ 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 резистора с $R = 250$ кОм при допустимой погрешности $\pm 15\%$, рассеиваемая мощность $P = 90$ мВт, диапазон температур 20–90°C ($\Delta T = 70^\circ\text{C}$). Резистор изготавливается фотолитографическим методом и имеет форму меандра.

Будем исходить из следующих технологических и конструктивных ограничений (см. табл. 11.2): $b_{\min} = 0,1$ мм; $\Delta b_\tau = \pm 0,01$ мм; $\Delta R_s/R_s = \pm 0,05$ и $K_\Phi = 50$.

Определим резистивный материал исходя из $R_s = R/K_\Phi = 5$ кОм/□. Из табл. 8.2 ($R_s = 5$ кОм/□) возьмем кермет с $\text{ТКС} = -4 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $P_0 = 2$ Вт/см². Будем рассматривать наилучший случай. Тогда из (16.7) $b_\tau \approx 0,16$ мм. Из (13.116) имеем $b_p = \sqrt{P/(K_\Phi P_0)} = 0,30$ мм, а из (13.10) $b = 0,3$ мм. Примем $a = 100$ мкм (см. рис. 16.2,а). Из (16.46) получим $A_m \approx 6$ мм². Примем, что меандр квадрат, тогда $L \approx 2,45$ мм. Длина должна быть кратна шагу меандра $m \cdot a + b = 0,4$ мм, поэтому положим $l/m = 6$, а $L = 2,4$ мм. Из соотношения (16.4а) найдем уточненную площадь меандра $A_m = 6,41$ мм². При этом высота меандра $H = l + 2b = 2,68$ 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 фотолитографии (требуется использовать резисторы большой ширины b). В том случае, если необходимо обеспечить повышенную точность (порядка единиц

^{*} Учет нестабильности резистивного слоя, связанной со старением, легко учитывается в (16.6) добавлением еще одного члена, аналогичного последнему.

процентов), используются подстраиваемые резисторы. Наибольшее распространение получила подстройка с переменным шагом. 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 Δl_n ($\Delta l_n = 2b|\Delta R'_0|/R_0$ — участок подстройки без учета перекрывающихся резистор проводников, рис. 16.3). Участок Δl делится на секции, получаемые последовательным делением на 2 до тех пор, пока разброс, вносимый каждой из

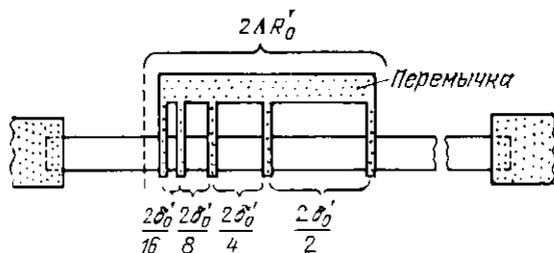


Рис. 16.3. Подстраиваемый пленочный резистор

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 Δl_n отключен) имеет разброс $\delta'_0 \leq 0$. Между числом секций подстройки и разбросом номинала существует следующая связь:

$$|\delta_0| \geq 2|\delta'_0| - (2|\delta'_0|/2^1 + 2|\delta'_0|/2^2 + \dots + 2|\delta'_0|/2^n). \quad (16.8a)$$

Преобразуя (16.8a), получаем

$$|\delta_0| \geq |\delta'_0|/2^{n-1}. \quad (16.8b)$$

Из (16.8b)

$$n \geq 1 + \log_2 |\delta'_0/\delta_0|. \quad (16.9)$$

Число секций равно ближайшему большему числу, получаемому из (16.9). При изготовлении резистора измеренное сопротивление ($R_{0н}$) лежит внутри интервала $R_0 - |2\Delta R'_0| < R_{0н} < R_0$. Перерезая соответствующие области перемычки, включают требуемые участки подстроечной части резистора.

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: $\Delta l_n = 2bK_\Phi|\delta'_0| = 4500$ мкм. Из (16.9) получим необходимое число секций $n > 3,32$. Примем $n = 4$. Длину секций найдем делением Δl_n на 2, 4, 8 и 16. Округляя с точностью ± 5 мкм, полу-

чаем следующие длины секций (Δl_i): $\Delta l_1=2250$ мкм; $\Delta l_2=1130$ мкм; $\Delta l_3=560$ мкм и $\Delta l_4=280$ мкм. При правильном определении длины секций погрешность, вносимая последней секцией (Δl_4), не должна превышать $|\delta_1|$: $\Delta l_4/(bK_\Phi) \approx 0,02 \leq |\delta_0| = 0,03$.

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).

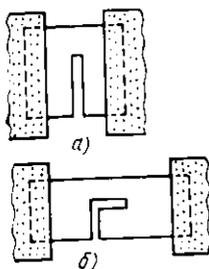


Рис. 16.4.



Рис. 16.5.

Рис. 16.4. Топология пленочных резисторов для лазерной подстройки при $K_\Phi \leq 1$ (а) и $K_\Phi > 1$ (б)

Рис. 16.5. Топология подстраиваемого толстопленочного резистора

Рассмотренные методы могут лишь увеличивать сопротивление резистора, поэтому при такой подстройке его сопротивление следует проектировать заниженным.

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. Значение последней может быть оценено по формуле

$$C_n = 0,0885 \epsilon_n C_r, \quad (16.10)$$

где C_n — погонная емкость, пФ/см; ϵ_n — относительная диэлектрическая проницаемость подложки; C_r — коэффициент, имеющий размерность емкости и зависящий от геометрических размеров конструкции [$C_r = 2K/\sqrt{1-K^2}$, $K = \text{th}(\pi b/4d_n)$ и d_n — толщина подложки]. Собственная удельная емкость резистора составляет сотые доли, а удельная емкость участка резистивный слой — корпус может составлять до десятых долей пикофарды на квадратный миллиметр. 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 (13.18), а граничная частота — из формулы (12.9).

Толсто пленочные резисторы по своей конфигурации близки к тонко пленочным. Методики их расчета также аналогичны. Поэтому остановимся лишь на некоторых отличиях.

Геометрические размеры толсто пленочных резисторов рассчитываются с помощью тех же соотношений, что и тонко пленочные. Однако погрешность их изготовления достигает 50 %. Это приводит к необходимости осуществлять либо абразивным, либо лазерным методом. После подгонки отклонение от номинала составляет $\pm 2\%$, а при прецизионной подгонке может составлять 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 ГИС необходимо иметь полную характеристику используемых резистивных паст. Не рекомендуется использовать более трех резистивных паст. Толсто пленочные резисторы обычно имеют прямолинейную форму (см. 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_f резистора не должен превышать 10, желательно иметь $K_f \leq 3$. С помощью толсто пленочной технологии удается 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 у тонко пленочных резисторов (см. рис. 16.4). При абразивной обработке удобно использовать структуру, показанную на рис. 16.5. Штриховой линией показан участок резистивной пленки, удаляемый в процессе абразивной обработки. Указанные методы увеличивают сопротивление резистора, поэтому при необходимости подстройки его сопротивление следует проектировать заниженным.

16.1.2. Конденсаторы. Тонко пленочные 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 пикофард до сотых долей микрофарды.

Емкость пленочного конденсатора определяется по обычной формуле [см. (11.1)]

$$C = \epsilon_d \epsilon_0 A_{в.о} K_{кр} / d, \quad (16.11)$$

где ϵ_d — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $A_{в.о}$ — площадь верхней обкладки. Отличие соотношения (16.11) от (11.1а)

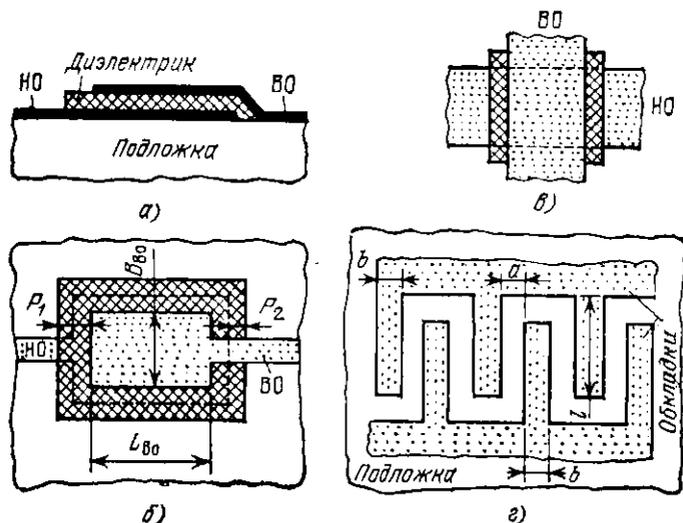


Рис. 16.6. Структура (а) и топологии пленочных конденсаторов с обкладками прямоугольной формы (б), в виде пересекающихся проводников (в) и гребенчатой формы (г)

заключается в наличии коэффициента $K_{кр}$, учитывающего влияние краевого эффекта на емкость. Значение $K_{кр}$ можно представить как

$$K_{кр} = \begin{cases} 1 & \text{при } A_{в.о} \geq 0,05 \text{ см}^2; \\ 1,3 - 6 A_{в.о} & \text{при } 0,01 \leq A_{в.о} < 0,05 \text{ см}^2, \end{cases} \quad (16.12)$$

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 перекрещивающихся полосок, разделенных слоем диэлектрика (рис. 16.6, в), что позволяет уменьшить погрешности емкости изготавливаемого конденсатора*). 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

* Обычно минимальная площадь ВО — не менее 1 мм^2 , а суммарная площадь всех ВО — не более 2 см^2 .

рис. 16.6,г. Емкость такого конденсатора обусловлена краевыми эффектами:

$$C = (\epsilon_n + 1) \epsilon_0 l [2 A_1 (N - 1) + A_2], \quad (16.13)$$

где $A_1 = 0,61 (d_n/a)^{0,25} (b/d_n)^{0,44}$; $A_2 = 0,77b / [(2N - 1)(a + b)] + 0,41$; N — число секций*) обкладок; d_n — 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

$$d_{\min} \geq K_3 U_p / E_{\text{пр}}, \quad (16.14)$$

где $K_3 = 2 - 3$ — коэффициент запаса по напряжению; $E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность диэлектрика. Величина d_{\min} определяет максимальную удельную емкость $C_{0 \max 1}$, обеспечивающую необходимое напряжение U_p .

Допуск на номинал конденсатора складывается из погрешностей геометрических размеров ВО конденсатора, толщины диэлектрика и температурной нестабильности:

$$\Delta C/C = \delta_A + \delta_d + \delta_T, \quad (16.15)$$

где $\delta_A = \Delta A_{\text{в.о}} / A_{\text{в.о}}$; $\delta_d = \Delta d / d = 0,05 - 0,10$; $\delta_T = \Delta T \cdot \text{ТКЕ}$.

Введя $K_\Phi = L/B$ (см. рис. 16.6,б) и считая $\Delta L_{\text{в.о}} = \Delta B_{\text{в.о}}$, получаем

$$\delta_A = \Delta L_{\text{в.о}} (1 + K_\Phi) / \sqrt{K_\Phi A_{\text{в.о}}}.$$

Для обеспечения допустимой точности δ_A необходимо, чтобы

$$A_{\text{в.о}} \geq (\Delta L_{\text{в.о}} / \delta_A)^2 (1 + K_\Phi)^2 / K_\Phi. \quad (16.16a)$$

Условие (16.16a) фактически определяет максимальную удельную емкость ($C_{0 \max 2}$), которая обеспечивает требуемое значение δ_A :

$$C_{0 \max 2} = C (\delta_A / \Delta L_{\text{в.о}})^2 K_\Phi / (1 + K_\Phi)^2. \quad (16.16b)$$

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 (см. рис. 16.6,б,в), но и *фигурной* (для наилучшего использования площади подложки). Емкость конденсатора практически не зависит от формы обкладок при постоянной площади их перекрытия. Значение δ_A можно определить как

$$\delta_A \approx \Pi \Delta / A_{\text{в.о}},$$

где Δ — отклонение линейного размера от расчетного; Π — периметр.

Пример. Рассчитать геометрические размеры тонкопленочного конденсатора $C = 1000$ пФ с $U_p = 50$ В, диапазоном температур $-10 \div +100^\circ\text{C}$ и допуском на

*) На рис. 16.6,г число секций $N = 3$.

номинал $\pm 15\%$. Конденсатор изготавливается с помощью фотолитографии, $\Delta L_{в.о} = \pm 10$ мкм, расстояния между границами верхней и нижней обкладок $P_1 = 0,2$ мм, а между границей нижней обкладки и диэлектрика $P_2 = 0,1$ мм, $\Delta d/d = 0,1$. Конденсатор имеет квадратную форму ($K_\Phi = 1$).

Из табл. 8.3 в качестве материала диэлектрика выберем монооксид кремния (SiO): $\epsilon \approx 5,5$; $E_{пр} = 2 \cdot 10^6$ В/см; $ТКЕ = 2 \cdot 10^{-4}$ °С⁻¹. Из соотношения (16.14) для $K_3 = 3$ найдем $d_{min} \geq 0,75$ мкм. Для $d_{min} = 0,75$ мкм из (11.1а) получим $S_{max1} = 6490$ пФ/см². Из соотношения (16.15)

$$\delta_A = \Delta A_{в.о} / A_{в.о} = \Delta C / C - \Delta d / d - \Delta T \cdot ТКЕ.$$

При заданных $\Delta C / C$, $\Delta d / d$, ТКЕ и перепаде температур $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ (относительно комнатной температуры) получим $\delta_A = 0,034$. Из (16.166) имеем $S_{max2} = 0,289$ мкФ/см². Из двух значений S_{max1} и S_{max2} выбираем минимальное $S_0 = 6490$ пФ/см². Отношение $C / C_0 = 0,154$ см², поэтому из условия (16.12) $K_{кр} = 1$ и площадь ВО конденсатора $A_{в.о} = C / (C_0 K_{кр}) = 0,154$ см². Так как $K_\Phi = 1$, то геометрические размеры ВО с точностью ± 5 мкм равны

$$L_{в.о} = B_{в.о} = \sqrt{A_{в.о}} \approx 3,92 \text{ мм.}$$

Геометрические размеры НО и диэлектрика (L_d , B_d) равны соответственно

$$L_{н.о} = B_{н.о} = L_{в.о} + 2P_1 = 4,32 \text{ мм; } L_d = B_d = L_{м.о} + 2P_2 = 4,52 \text{ мм.}$$

Отклонение от номинального значения менее 10—15 % получается в подстраиваемых пленочных конденсаторах. Использование в качестве диэлектрика пентаоксида тантала также позволяет уменьшить отклонение от номинального значения до 5 %.

Добротность конденсатора или обратная ей величина $\text{tg } \delta$ определяется активными потерями в металлических обкладках конденсатора ($\text{tg } \delta_m$) и диэлектрике ($\text{tg } \delta_d$):

$$Q^{-1} = \text{tg } \delta = \text{tg } \delta_m + \text{tg } \delta_d, \quad (16.17)$$

где $\text{tg } \delta_d$ (см. табл. 8.3) не превышает 0,02; $\text{tg } \delta_m \approx 2\omega r_{м.п} C$, где $r_{м.п}$ — эффективное сопротивление обкладки конденсатора переменному току.

Для конденсатора с расположением выводов, показанным на рис. 16.6,б,

$$\text{tg } \delta_m \approx 2\omega r_m C/3, \quad (16.18)$$

где r_m — сопротивление обкладки. При ином расположении выводов обкладок и при фигурных обкладках значение $\text{tg } \delta_m$ 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 $C = 50$ — 2500 пФ с погрешностью $\pm 15\%$ и имеют $U_{пр} \geq 150$ В. В некоторых случаях допускается подгонка конденсаторов абразивным методом, обеспечивающая точность до 1 %.

16.1.3. Пленочные индуктивные элементы. В ГИС в качестве индуктивности наиболее часто используются плоские спирали (рис. 16.7) из материалов высокой электропроводности. Основными параметрами индуктивных элементов являются: индуктивность L ,

добротность Q и собственная резонансная частота f_0 , определяемая индуктивностью L и межвитковой емкостью.

На рис. 16.7 показаны два типа спиралей: круглой (а) и квадратной (б) форм. При одинаковых площадях последняя дает несколько большую (приблизительно на 10 %) индуктивность, но меньшую добротность из-за большей длины спирали и наличия

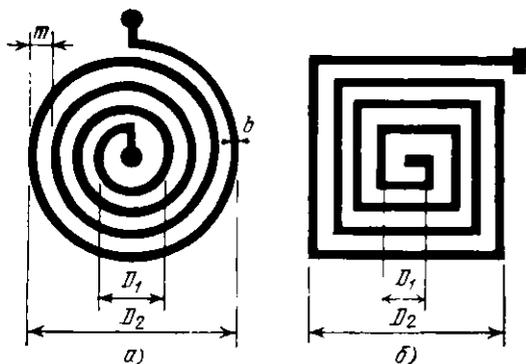


Рис. 16.7.

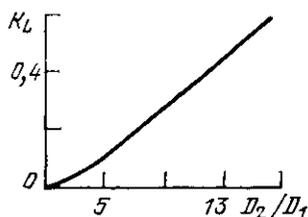


Рис. 16.8.

Рис. 16.7. Топология катушек индуктивности круглой (а) и прямоугольной (б) форм

Рис. 16.8. Зависимость характеристического коэффициента K_L катушки индуктивности от ее геометрических размеров

изгибов. Поэтому в основном используются круглые спирали. Вследствие ограничений на геометрические размеры индуктивности не превышает единиц микрогенри^{*}. 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 индуктивности используется выражение

$$L = (K_L / m)^2 D^3, \quad (16.19)$$

где L — в мкГн; m , D — в мм. Коэффициент K_L находится из кривой рис. 16.8. Ориентировочное значение добротности

$$Q = 16 f D_1 K_L^2 b \{R_s m [(D_2/D_1)^2 - 1]\}^{-1}, \quad (16.20)$$

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

$$L \approx L_0 [1 + (f/f_0)^2], \quad (16.21)$$

^{*} Обычно полагают, что внешний диаметр $D_2 \leq 10$ мм, а внутренний $D_1 \geq 0,5$ мм.

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 влияния скин-эффекта, то реальную ширину следует взять в 1,5—2 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. 16.7,а и изготовленной из серебра. Примем: $D_1=0,5$ мм; $b=0,1$ мм; $m=0,2$ мм; $n=10$; толщина пленки серебра $d=10$ мкм, удельное сопротивление серебра $\rho=1,6 \cdot 10^{-8}$ Ом·см (см. табл. 14.4).

Из выражения (16.19) и данных рис. 16.8 получим $L=0,27$ мкГн. Из (16.20) при $R_s=\rho/d=1,6 \cdot 10^{-3}$ Ом/□ получим $Q \approx 130$. Реальная добротность будет в 2—3 раза меньше.

16.1.4. Проводники. Проводники используются для соединения различных элементов и компонентов ГИС. Значения R_s тонкопленочных проводников составляют от сотых до десятых долей Ом на квадрат.

Рассмотрим влияние перекрытия проводником (h) резистивной пленки (см. рис. 16.1) на переходное сопротивление. Сопротивление области перекрытия

$$R_{\text{пер}} = (\sqrt{R_s \rho_n}/b) \operatorname{cth}(h \sqrt{R_s/\rho_n}), \quad (16.23a)$$

где R_s — удельное сопротивление слоя резистивной пленки; ρ_n — удельное переходное сопротивление контакта в Ом·мм²; b и h — в мм. Из выражения (16.23a) следует, что при $h \sqrt{R_s/\rho_n} \geq 2,5$

$$R_{\text{пер min}} \approx \sqrt{R_s \rho_n}/b. \quad (16.23b)$$

Однако выполнение (16.23b) требует большого значения h . Уменьшение h до

$$h = 1,5 \sqrt{\rho_n/R_s} \quad (16.24)$$

приводит к увеличению переходного сопротивления лишь на 10%. Превышение величиной h значения, получаемого из (16.24), практически не улучшает характеристик контакта. Обычно $\rho_n=0,05$ — $0,25$ Ом·мм².

Пленочные проводники характеризуются теми же паразитными параметрами, что и проводники в полупроводниковых ИС (см. § 14.3). Собственная паразитная емкость

$$C = 0,0241 l \epsilon_p / l g^2 (4l/b), \quad (16.25a)$$

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

$$C = 0,0442 l \epsilon_p \operatorname{th} [\pi a/(2d_n)] \operatorname{cth} [\pi(a+b)/(2d_n)], \quad (16.25b)$$

где d_n — толщина диэлектрической подложки; l — в см; C — в пФ. Наличие паразитной индуктивности сказывается на частотах $f \geq 50$ МГц и ее значение оценивается по формуле

$$L = 0,02 l [2,3 \lg(2l/b) + 0,22 b/l + 0,5], \quad (16.25в)$$

где L дано в мкГн, l — в мм.

Организация многослойного монтажа в ГИС проводится аналогично полупроводниковым ИС (см. § 14.3). В качестве диэлектриков используются монооксид 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 исходя из условия, что удельная рассеиваемая мощность в проводнике не более $1-2$ Вт/см².

У толстопленочных проводников $R_s = 0,01-5$ Ом/□ в зависимости от типа используемой пасты. Соотношение между максимальным током, 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 ГИС 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 соответствующим этапам разработки топологии полупроводниковых ИС (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 малой длиной последних. 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 схемы в соответствии с конструктивными требованиями. При анализе полученной схемы соединений следует изыскивать возможности уменьшения длины соединительных пленочных проводников, сокращения числа их пересечений. Для этого производится перестановки НК, изменение их ориентации, а также 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. Исходными данными для этого этапа являются коммутационная схема, рассчитанные геометрические размеры пленочных элементов и геометрические размеры НК.

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. п.

Разработку предварительного варианта топологии целесообразно проводить в следующей последовательности: размещение внешних контактных площадок, прямоугольных резисторов с $K_f \leq 10$, конденсаторов с площадью ВО до 25 мм² и индуктивностей, резисторов сложной конфигурации и конденсаторов больших номиналов. Кроме того, элементы и компоненты ГИС, рассеивающие большую мощность, равномерно размещать по площади платы. После размещения элементов на подложке осуществляется разводка (трассировка) проводников. В некоторых случаях при заданной технологии изготовления (однослойная металлизация) и выбранном расположении пленочных элементов и НК осуществить разводку невозможно. При этом необходимо произвести перестановку пленочных элементов и НК.

При разработке варианта топологии следует предусматривать возможность измерения номинальных значений пленочных элементов. Обычно в первом предварительном варианте не удается получить приемлемую конфигурацию слоев. Поэтому делаются два—три варианта топологии с изменением геометрии пленочных элементов соответствующей ее корректировкой для обеспечения заданных параметров пленочных элементов.

Получение окончательного варианта топологии и проверка его качества проводятся по аналогии с полупроводниковой ИС.

Топология толстопленочных ГИС разрабатывается аналогично тонкопленочным ГИС. Некоторые отличия связаны с более простыми конфигурациями толстопленочных элементов. Этой особенностью в первую очередь определяются требования облегчения нанесения проводящих и резистивных паст и облегчения подгонки сопротивлений резисторов. Для этого указанные элементы располагаются параллельно осям координат. 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 микросхемы 4-й степени интеграции (число элементов более 1000).

Существуют две разновидности БИС: полупроводниковые и гибридные. Рассмотрим особенности тех и других.

17.1.1. 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 тонкой имплантации и др. Однако имеются теоретические пределы для плотности элементов: для МДП-транзисторов 10^7 — 10^8 , для биполярных транзисторов 10^6 на квадратном сантиметре. Использование многослойной металлизации также позволяет увеличить 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 $1,5 \times 1,5$ мм, то в 1973—1975 гг. он увеличился до 6×6 мм, а в настоящее время — до 10×10 мм. 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 (топологических фрагментов). Между последними предусматриваются свободные промежутки, необходимые для межсоединений. Матричная БИС выполняет заданные функции лишь на заключительном этапе изготовления, когда осуществлены необходимые межэлементные соединения.

С повышением степени интеграции повышается быстродействие схем, так как минимизируются паразитные параметры, вносимые металлизированными соединениями. Однако повышение степени интеграции связано и с рядом трудностей, проявляющихся на раз-

личных этапах создания БИС, особенно при разработке ее топологии. Трудоемкость ручного проектирования БИС может быть приближенно оценена следующим формулам:

$$T_a = 70 N^{0,55} \quad (17.1a)$$

для аналоговых схем

$$T_k = 45 N^{0,55} \quad (17.1б)$$

для цифровых схем.

Здесь N — число элементов БИС; T — трудоемкость проектирования, ч. При полной автоматизации проектирования БИС 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 числе элементов 10^5 автоматизация проектирования БИС позволяет уменьшить сроки разработки приблизительно в 120 раз.

17.1.2. Гибридные БИС (БГИС). В ГИС, так же как и в полупроводниковых ИС, происходит увеличение степени интеграции. В БГИС на одной подложке могут быть объединены как различные элементы, так и компоненты, в том числе ИС 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 ИС, БИС и других компонентов. Чаще всего БГИС содержат бескорпусные ИС и БИС, объединенные металлической разводкой. Поэтому создание БГИС обычно сводится к коммутации ИС 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, изготавливаемым 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 и либо полное, либо частичное исключение последней. Эти требования реализуются в интегральной инжекционной логике (И²Л), в БИС на основе изопланарных транзисторов и МДП-транзисторов с малой длиной канала.

17.2.1. Интегральная инжекционная логика. На рис. 17.1,а показана структура И²Л-вентилля. Как видно, он состоит из горизонтального транзистора $p-n-p$ -типа с эмиттерной областью, назы-

ваемой инжектором, и $n-p-n$ -транзистора, работающего в инверсном режиме*) (см. п. 12.3.2). Транзистор $p-n-p$ -типа является генератором тока для питания базовой цепи $n-p-n$ -транзистора (рис. 17.1, б), и обычно он заменяется генератором тока I^* , показанным на рис. 17.1, в.

На рис. 17.2 в качестве примера представлены соответственно электрическая схема и эскиз топологии полусумматора. Штриховыми линиями обозначены входные и выходные цепи. Как видно

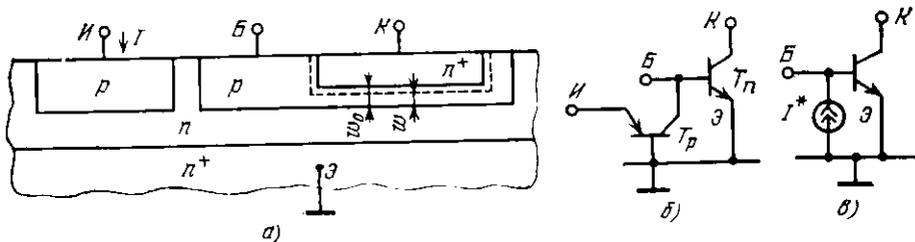


Рис. 17.1. Структура (а) и эквивалентные схемы (б, в) И²Л-вентиля

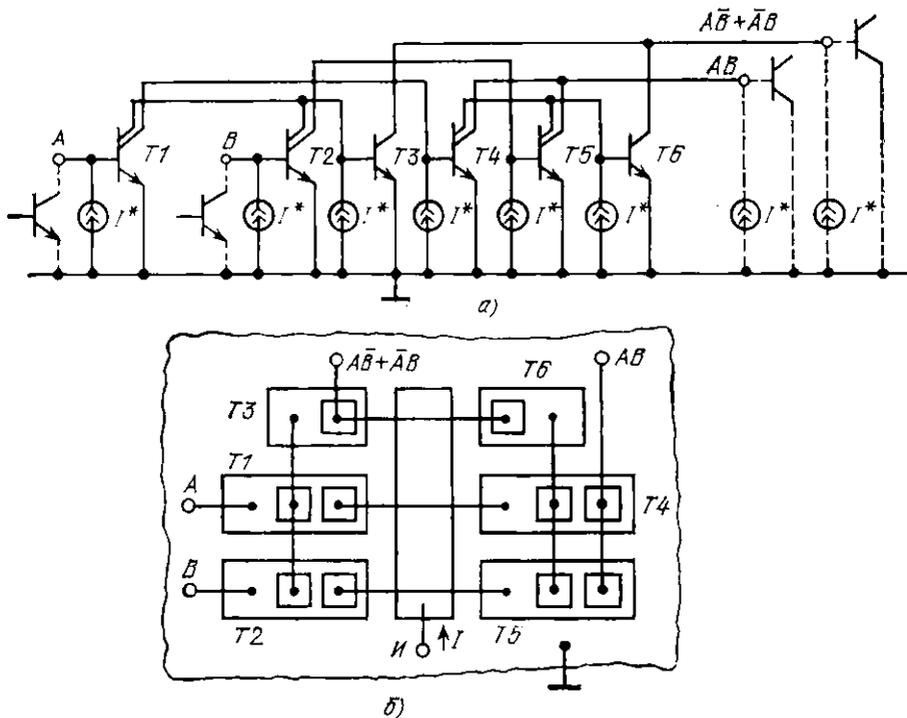


Рис. 17.2. Электрическая схема (а) и эскиз топологии (б) полусумматора на основе И²Л-вентилей

*) Инверсный режим работы является нормальным для схем И²Л, поэтому в дальнейшем термин «инверсный» не будет использоваться.

из рисунков, для обеспечения работоспособности И²Л-вентилей 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. п. 12.4.2). Кроме того, для возможности насыщения $n-p-n$ -транзисторов необходимо, чтобы их коэффициенты усиления удовлетворяли условию $B > 1$. Последнее может быть достигнуто при рабочих токах, существенно меньших микроампера.

Широкое распространение ИС 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. Обычно потенциал полупроводниковой пластины поддерживается равным нулю.

2. Отказ от традиционного способа питания базовых областей $n-p-n$ -транзисторов (через резисторы) позволяет практически полностью исключить резисторы.

3. Многоколлекторные $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторы позволяют сократить число транзисторов, используемых для реализации заданной функции.

4. Потребляемая мощность (до единиц нановатт) позволяет использовать структуры с минимально возможными геометрическими размерами. Рассмотренные факторы облегчают создание БИС на основе И²Л.

При определении структуры и геометрических размеров $p-n-p$ -транзисторов используются данные п. 12.4.2, а условие $B > 1$ накладывает специфические требования на геометрию $p-n-p$ -транзисторов и легко реализуется на практике (см. первый пример п. 12.3.2).

17.2.2. Изопланарные транзисторы. Уменьшение геометрических размеров транзисторов и повышение их граничных частот достигаются в изопланарной технологии, получившей в настоящее время наибольшее распространение при изготовлении БИС. Наиболее совершенной является изопланарная технология на эпитаксиальных $p-p^-$ -пленках.

На рис. 17.3, а, б показаны конфигурации транзисторов типов $p-n-p$ 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^{*}). Характерной особенностью изопланарных транзисторов является ограничение боковой диффузии примесей слоем SiO₂, что обеспечивает самосовмещение диффузионных областей и не требует большой точности при фото-

^{*} В изопланарных транзисторах удельные сопротивления слоев n^- , p^- , n^+ -типов имеют значения 300—500, 80—100, 4—5 Ом/μ² соответственно.

литографии. 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 приводят к существенному уменьшению емкости эмиттерного и коллекторного переходов и площади, занимаемой транзистором. Для еще большего уменьшения емкостей $p-n$ -переходов $p-n-p$ -транзистора проводится добавочное окисление (штри-

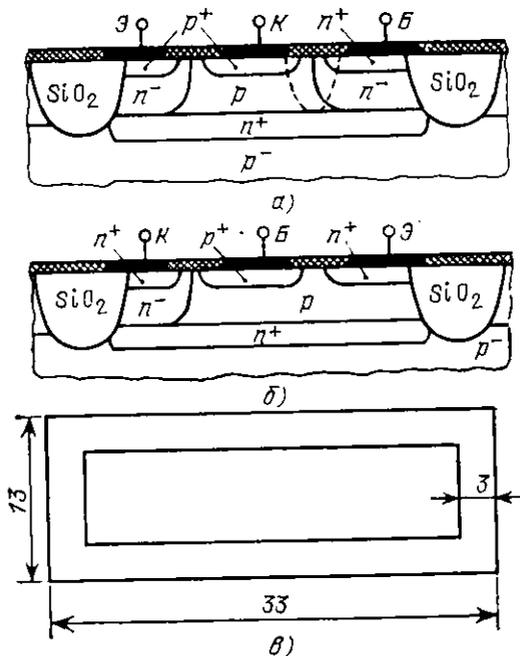


Рис. 17.3. Структура изопланарных транзисторов типов $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) на эпитаксиальных p -пленках и геометрия фотошаблона для изоляционной области SiO_2 (в)

ховая линия на рис. 17.3,а). На рис. 17.3,в показаны геометрия и ориентировочные размеры окна в защитных пленках для проведения разделительного окисления. Из рисунка видно, что транзисторы имеют площадь $30 \times 10 \text{ мкм}^2$ (с учетом половины площади окна для проведения разделительного окисления^{*)}.

Малые геометрические размеры изопланарных транзисторов обеспечиваются благодаря их указанным особенностям и уменьшению минимальных размеров контактных окон, ширины шин металлизации и расстояния между ними. Это увеличивает предельную частоту транзисторов до значений порядка нескольких гигагерц.

^{*)} Минимальная ширина шин металлизации полагалась 5–6 мкм и минимальный зазор между шинами 3–4 мкм.

17.2.3. МДП-транзисторы с малой длиной канала. Для улучшения характеристик МДП-транзисторов в БИС необходимо уменьшать длину канала и площадь транзистора.

На рис. 17.4,а 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 ,

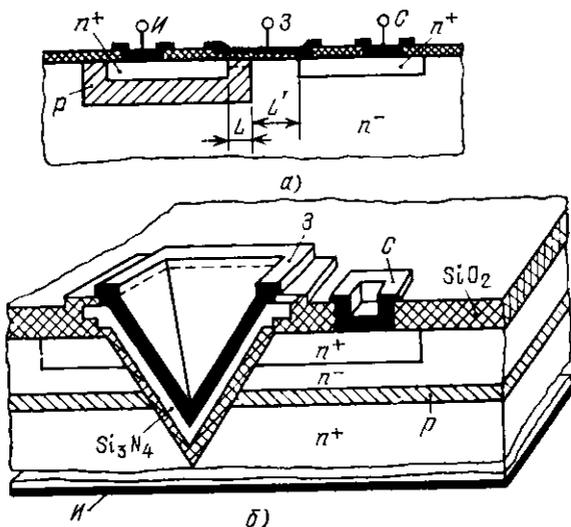


Рис. 17.4. Структуры D-МДП (а) и V-МДП (б) транзисторов

так же как и толщину базы биполярного транзистора ($L \leq 1$ мкм). Длина канала определяется длиной только p -области. 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. 17.4,б) 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. § 2.4) 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. Исходя из технологических требований и стабильности характеристик подзатворный диэлектрик имеет структуру двуокись кремния — нитрид кремния. Подзатворный окисел неодинаков по толщине. Обозначим d_c , d_n

и d_p толщины слоев областей стока n^+ -, n^- - и p -типов. Тогда длина канала

$$L = d_p / \cos(\theta/2); \quad (17.2a)$$

средняя ширина канала при квадратной форме основания вытравленной пирамиды со стороной, равной a , и при $d_p \ll d$ [$d = a \operatorname{tg}(\theta/2)$ — высота пирамиды] имеет вид

$$\bar{Z} = 8[a/2 - (d_c + d_n + d_p/2) \operatorname{tg}(\theta/2)], \quad (17.2b)$$

а отношение

$$\bar{Z}/L = (8/d_p) \cos(\theta/2) [a/2 - (d_c + d_n + d_p/2) \operatorname{tg}(\theta/2)]. \quad (17.2b)$$

Малая длина каналов D-МДП- и V-МДП-транзисторов позволяет изготавливать логические схемы на их основе с временем переключения порядка единиц наносекунд.

Пример. Рассчитать L , Z и L/Z для V-МДП-транзистора. Примем $a = 10$ мкм; $d_c = d_n = d_p = 1$ мкм.

Используя соотношения (17.2), получаем $L = 1,2$ мкм; $Z = 26$ мкм; $Z/L \approx 22$.

§ 17.3. Задачи машинного конструирования

При создании БИС, как следует из п. 17.1.1, 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 документирования 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.

Процесс машинной разработки БИС можно разделить на следующие этапы: расчет структуры и геометрии элементов, компоновка элементов и трассировка межсоединений, разработка конструкторской документации.

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 мето-

дов 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**, в которой 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.

17.4.1. 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 элемента необходимо связать его выходные электрические параметры с параметрами физической структуры и с топологией 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.

17.4.2. 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 находятся приближенные решения уравнений, которые впоследствии «сшиваются» на границах раздела. Этот подход может применяться в структурах со значительными геометрическими размерами и глубинами залегания переходов $d \gg 1-2$ мкм.

2. Структура транзистора не делится на области, и исходные уравнения решаются для всей структуры в целом. Очевидно, что методам 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 можно использовать ряд алгоритмов. Рассмотрим лишь один из них — *итерационный алгоритм Гуммеля* для одномерной структуры (рис. 17.5). В качестве независимых переменных взяты электростатический потенциал $\varphi(x)$ и квазипотенциалы Ферми для электронов $\varphi_n^0(x)$ и дырок $\varphi_p^0(x)$. 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 уравнений непрерывности $\varphi_n^0(x)$, $\varphi_p^0(x)$ и, следовательно, $n^0(x)$, $p^0(x)$. Из уравнения Пуассона получим уточнение нулевого приближения $\delta^0(x)$. В дальнейшем итерационный процесс повторяется. В каждой последующей итерации получается уточненное значение $\varphi^{i+1}(x) = \varphi^i(x) + \delta\varphi^i(x)$.

* Обычно такие модели используются только для активных приборов.

Итерационный алгоритм Гуммеля разработан в предположении достаточно точного начального приближения $\varphi^0(x)$. При этом $|\delta\varphi^i(x)/\varphi^i(x)| \rightarrow 0$, если $i \rightarrow \infty$. Реально итерационный процесс заканчивается, когда $|\delta\varphi^i(x)| < \epsilon$, 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.

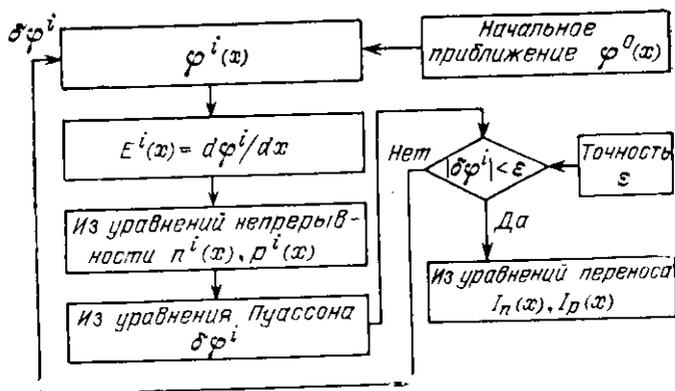


Рис. 17.5. Итерационный алгоритм Гуммеля

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.

Разрабатывать физико-топологические модели всех элементов схемы целесообразно, так как они формируются в едином технологическом цикле, и просто невозможно. Поэтому физическая структура определяется только для основного, наиболее важного, транзистора. В качестве исходных данных для расчета других элементов (транзисторов, диодов, резисторов и др.), входящих в состав полупроводниковой БИС, используется выбранная физическая структура основного транзистора. Параметры остальных элементов определяются только заданием их геометрии.

§ 17.5. Математические модели элементов

Для топологического проектирования БИС используются математические модели элементов. Их существует несколько разновидностей.

17.5.1. Геометрическая модель. Эта модель характеризует *геометрические размеры* элемента* и расположение его выводов.

Точная геометрическая модель совпадает с топологией элемента и задается поточечным описанием всех входящих в него контуров в прямоугольной системе координат с указанием для каждого контура соответствующего ему номера слоя (эмиттерный, базовый и др.). На рис. 17.6,а представлена точная геометрическая модель МДП-транзистора в комплементарной схеме (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) , такое описание является избыточным. Геометрию элемента можно описать и через одну точку, как

* Геометрические модели могут быть получены из физико-топологических моделей.

показано для области 1—4 (цифры в скобках). Это позволяет уменьшить число 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, так и соответствующими расстояниями. Наиболее простая геометрическая модель обычно представляет собой прямоугольник, покрывающий элемент (прямоугольник 1—4), с указанными на нем мест выводов. Эта модель может быть использована на этапе разработки эскиза топологии (см. § 15.1).

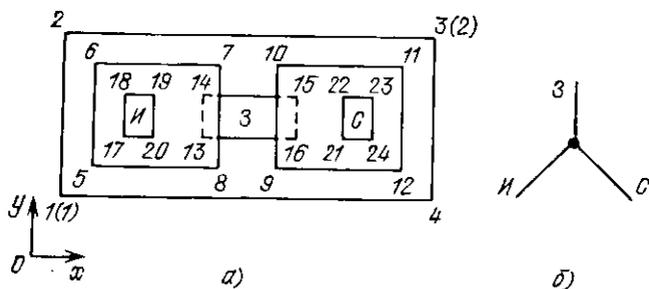


Рис. 17.6. Геометрическая (а) и точечная (б) модели МДП-транзистора

Рассмотренная модель хотя и отражает геометрию элемента, однако алгоритмизация процесса разработки топологии с ее помощью затруднена. Вследствие этого наряду с геометрической топологии с ее помощью распространение другой вид модели элементов.

17.5.2. Точечная модель. В ней элемент представляется в виде точки и исходящих из нее выводов, соответствующих необходимым выводам элемента (рис. 17.6, б). Существуют две модификации модели. В первой 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, являются заданная

производительность комплекса и необходимость эффективного взаимодействия разработчиков 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 достаточное высокое быстродействие и большой объем оперативной и внешней памяти (БЭСМ-6, ЕС-1060); 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.

Система разработки топологии должна решать следующие задачи: определение необходимого числа изолированных областей^{*}, размещение элементов, трассировку межэлементных соединений. Рассмотрим их подробнее.

17.6.1. Определение необходимого числа изолированных областей. Принципы компоновки изолированных областей рассмотрены в § 15.1. Ниже рассмотрим лишь 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 обеспечивает 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 $p-p-p$ -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

^{*} Это в первую очередь относится к БИС на биполярных транзисторах.

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 *мультимнобластиными* элементами. В качестве критерия оптимальности разбиения множества элементов на подмножества часто используется критерий *наименьшей связанности*, что означает наименьшее число межсоединений между отдельными изолированными областями. Для реализации решения по этому критерию осуществляются перестановки мультимнобластиных элементов. Часто перестановки осуществляются парами элементов, имеющими общий узел. При одинаковом значении критерия оптимальности для ряда вариантов предпочтение отдается варианту с максимальным числом элементов, расположенных в одной области.

17.6.2. Размещение элементов. Эта задача является одной из основных в проектировании топологии БИС. Критерием оптимальности размещения элементов может быть минимизация следующих целевых функций: суммарной длины соединений; наибольшей длины; числа пересечений соединений; числа слоев коммутации. Наибольшее распространение получил критерий обеспечения минимальной суммарной длины межсоединений.

Алгоритмы размещения можно классифицировать следующим образом: алгоритмы решения математических задач, являющихся моделями задач размещения; конструктивные алгоритмы; итерационные 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 с исходящими из нее выводами (см. п. 17.5.2).

Модель квадратичного назначения. В этой модели имеется фиксированный набор позиций, в которых могут быть размещены элементы. Степень связанности элементов, определяемая числом связывающих их целей, 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 связанности. Если имеются n элементов и n возможных позиций для их размещения, то производится n -шаговый процесс принятия решений. 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. п. 17.4.2). 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 предыдущего, 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 выше алгоритмы предполагают фиксированные места расположения элементов и являются наиболее развитыми. Эти алгоритмы применимы для разработки топологии БИС, состоящих 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. В том случае, если требуется разработать топологию самих ячеек или БИС состоит из различных узлов (ячеек, функциональных блоков), эти алгоритмы оказываются неприменимы 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 фиксированных 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*). 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 используется 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 статического равновесия системы материальных точек. Условием равновесия является равенство нулю сил и моментов, действующих на элементы. Использование алгоритма силовых функций при большом числе 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.

17.6.3. 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

*) В усложненных моделях могут быть учтены геометрические размеры элементов.

соединительных шин, ограничения на число их пересечений, число слоев металлизации и др.

Алгоритмические методы трассировки можно разделить на два основных типа: *топографические* и *грифо-теоретические*. В первом предпочтению отдается метрическому аспекту, во втором проводится предварительный анализ планарности схемы, 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 (расслоение). При расслоении соединений необходимо наиболее эффективно использовать площадь кристалла и минимизировать число слоев, число межслойных переходов и др. Распределение соединений по слоям можно выполнять до, в процессе и после трассировки отдельных соединений.

Наибольшее распространение в настоящее время получила двухслойная металлизация. Как показывает анализ, наиболее эффективным является предварительное расслоение, приводящее к лучшему использованию площади кристалла и уменьшению числа межслойных переходов. Расслоение до трассировки основано на выявлении соединений или их групп, которые при однослойной металлизации неизбежно приведут к наличию пересечений, увеличению длины шин металлизации и усложнению их формы. Наиболее простым способом расслоения является выделение некоторых преимущественных направлений, например вдоль координатных осей (x , y), группирование шин 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, число которых определяется числом элементов, технологическими и конструктивными требованиями и ограничениями. Обычно сторона квадрата $s = a + b$, где a — расстояние между шинами металлизации; b — ширина последних. Процесс трассировки состоит из поиска пути и его продвижения.

На рис. 17.7 представлен кристалл, разбитый 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.

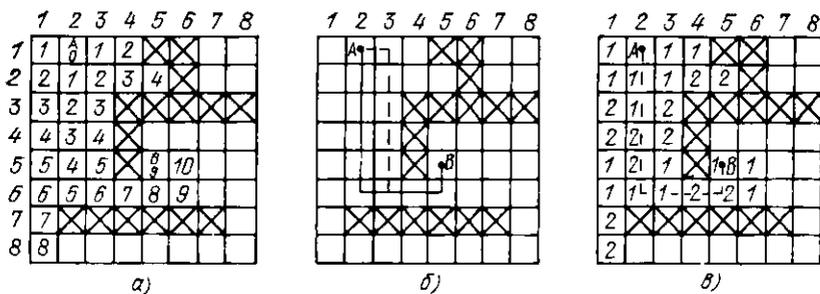


Рис. 17.7. Иллюстрации волнового алгоритма Ли (а), проложенной трассы (б) и его модификация (в)

17.7,а). Если волна не может дойти до квадрата B ввиду занятости ряда ячеек, то путь 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 при-

оритета: 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 $1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, \dots$ Этому случаю соответствует рис. 17.7,а. Указанная последовательность чисел определяет путь от A к B , показанный на рисунке штриховой линией. Возможное дублирование 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 нахождения пути (требуется вмешательство оператора), но обеспечивает равномерность расположения трасс.

Сочетание алгоритмов топографического моделирования и волнового на разных этапах трассировки имеет многочисленные модификации.

§ 17.7. Машинная разработка конструкторской документации

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, хотя и не включает, с автоматизированным изготовлением фотоматриц, некоторые аспекты которого также будут рассмотрены.

17.7.1. 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 на-

глядность. Наиболее важными критериями оценки качества КД являются: минимальная суммарная длина соединительных линий между элементами; минимальное количество внешних связей между страницами*); 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 проблемами размещения элементов и трассировки межсоединений, 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 является в настоящее время наиболее разработанной, поэтому рассмотрим ее подробнее.

17.7.2. Автоматизированный выпуск конструкторской документации на кристалл. Проектирование каждой БИС завершается изготовлением документации на кристалл и фотошаблонов. Конструкторская документация должна содержать описание послойных топологических чертежей. При выпуске ИС малой и средней степеней 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 числа 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. Основой системы является мини-ЭВМ. Ввод в 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 считываем. Этот метод удобен, но требует детальной прорисовки топологии в большом масштабе (1000:1 или 3000:1), что вызывает необходимость вводить топологию фрагментами. Кроме того, затруднена полная автоматизация процесса. Введение графических данных с помощью языка их описания осуществляется блоком «*Носитель*

*1 Часто схемы, таблицы и прочее не удается расположить на одной странице, и требуется их разбиение на несколько страниц.

информации». Языковый способ описания позволяет упростить кодирование, ликвидировать избыточность информации, обеспечивает удобство ее преобразования и контроля. Введение данных осуществляется перфолентами, перфокартами, магнитными лентами и др.

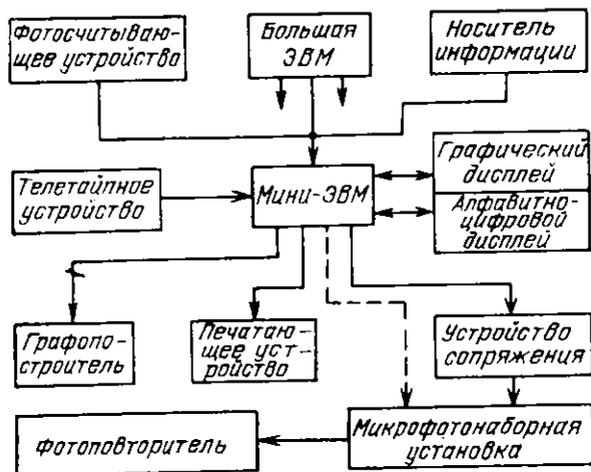


Рис. 17.8. Интерактивная система разработки документации на кристалл БИС

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. Возможны изменение масштаба изображения и получение на экране сразу нескольких слоев. С помощью графического дисплея производятся 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 *графопостроитель* либо на *печатающее* устройство.

Графопостроители бывают двух основных типов: рулонный и планшетный. Рулонный графопостроитель используется для быстрых, но менее точных по сравнению с планшетным прорисовок. Планшетный графопостроитель применяется для получения отлаженной топологии, прорисовки совмещенных слоев, их окончательного контроля и документирования.

Печатающее устройство осуществляет документирование результатов разработки топологии. Для схем малой и средней степеней 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. Последние изготавливаются на микрофотонаборной установке и фотоповторителе (см. § 6.4). При соответствующем программном обеспечении возможно непосредственное согласование мини-ЭВМ и фотонаборной установки, показанное на рис. 17.8 штриховой линией.

Возможности интерактивных систем во многом определяются языком описания графических данных, который помимо указанных выше задач позволяет унифицировать документацию по изделиям электронной техники, использовать обычное программное обеспечение с учетом трансляции входного языка на язык рабочих массивов: сблизить задачи синтеза топологии, выполнения КД и проектирования фотошаблонов. Язык описания графических данных должен быть универсальным (т. е. не зависящим от сложности схемы); несложным для обучения; обеспечивать возможность построения эффективных систем трансляции и др. Наиболее распространенные языки описания графических данных включают в себя основные понятия: *контур*, *фрагмент*, *оператор* и *топологический рисунок*.

Под контуром понимается замкнутая линия, состоящая из отрезков прямых, дуг окружностей. Контур описывается последовательностью его угловых точек. Под топологическим рисунком понимается совокупность контуров, лежащих в одной или нескольких плоскостях (для одно- или многослойного рисунка). Фрагмент включает часть контуров топологического рисунка, которому присвоено имя. Синтаксический фрагмент и топологический рисунок описываются одинаково. Под оператором понимается однозначное или многозначное преобразование в исходной плоскости. Существуют такие операторы, как оператор привязки, определяющий системы отсчета координат контура или фрагмента на кристалле; оператор поворота относительно точки привязки; оператор симметрии относительно некоторой оси; оператор матрицы, позволяющий, используя описание одного контура или фрагмента, осуществить их мультипликацию; оператор масштабирования и др.

Язык описания графических данных дает возможность существенно упростить описание топологического рисунка по сравнению с чисто координатным описанием (см. § 15.4).

Организацию функционирования системы в целом осуществляет операционная система. Она обычно выполняет следующие функции: распределение ресурсов процессора мини-ЭВМ между рабочими местами проектирования (дисплей, телетайп, изготовление фотоматриц), постановка очередной задачи, организация связи с внешними устройствами (графопостроитель, печатающее устройство и др.), организация интерактивного режима, объединение прикладных программ и др.

Прикладные программы обеспечивают контроль: топологии (искажение контура элемента в результате пропуска или сдвига одной из его угловых точек при кодировании); нарушения допусков на сближение контуров одного слоя; нарушения допуска на минимальный размер контура в слое; разрыв контура металлизации — и учитывают специфические особенности решаемой задачи.

Рассмотренная выше система является универсальной и может использоваться не только для получения КД на кристалл, но и для автоматизированного выпуска общей КД (если исключить блоки, предназначенные для автоматизации изготовления фотоматриц).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1. Минимальные значения геометрических параметров (мкм) элементов полупроводниковых ИС* (обозначения приведены на рис. 12.1.а)

Погрешность изготовления линейных размеров	0,3—0,5
Систематическое увеличение линейных размеров (растравливание окисной пленки)	0,6—0,9
Размер контактных площадок	75×75
Ширина металлизированных дорожек и расстояние между ними	7—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 a	10—12
Размер контактного окна f, z	3—4
Расстояние между границами окна под диффузию эмиттера и под контакт к последнему g	4—5
Расстояние между границами окон под базовую диффузию и под контакт к базовой области m	3—4
Расстояние между окнами под базовую и эмиттерную диффузии d	4—5
Расстояние между окном под эмиттерную диффузию и контактным окном к базовой области q	4—5
Расстояние между окнами под контакт к коллектору и под базовую диффузию b	7—10
Расстояние между границами окон под диффузию коллекторного контакта и под контакт к коллектору c	3—4
Перекрытие контактного окна металлизацией	2—3

* Эти значения являются ориентировочными, так как с развитием технологии изготовления ИС они уменьшаются.

Таблица П.2. Минимальные значения геометрических параметров (мкм) в ГИС*)

Параметр	Ф**	М	Т
Погрешность линейных размеров элементов и расстояний между ними при их расположении в одном слое	10	10	100
Расстояние между элементами, расположенными в одном слое	100	300	300
Перекрывание элементов, расположенных в разных слоях	100	200	200
Расстояние между элементами, расположенными в разных слоях	100	200	400
Расстояние от элемента до края подложки	200	500	100
Ширина резистора	100	100	600
Длина резистора	100	300	600
В конденсаторе расстояния между краями:			
верхней и нижней обкладок	200	200	300
диэлектрика и краями нижней обкладки	100	200	200
диэлектрика и местами соединения выводов обкладок с другими элементами	300	300	400
Ширина 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

* См. сноску к табл. П.1.

** Ф и М — фотолитографическая и масочная технологии изготовления тонкопленочных ГИС; Т — толстопленочная технология.

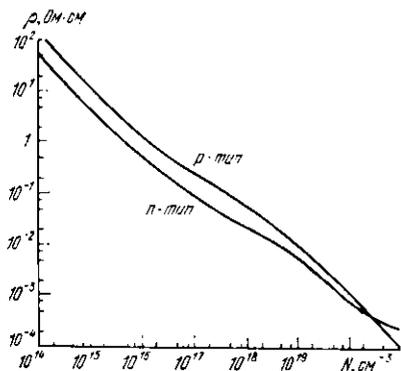


Рис. П.1. Зависимость удельного сопротивления полупроводниковой пластины от концентрации примесей и типа проводимости

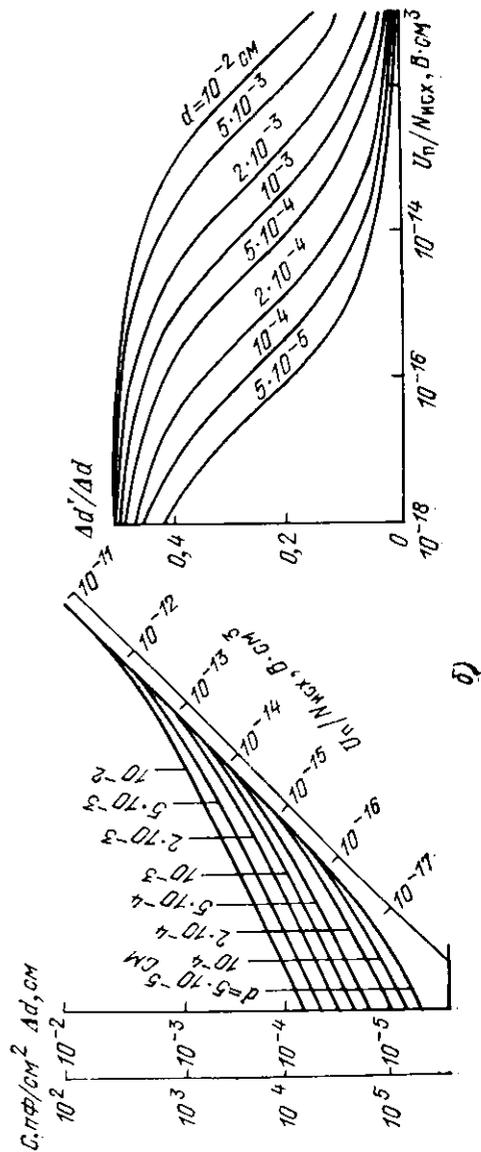
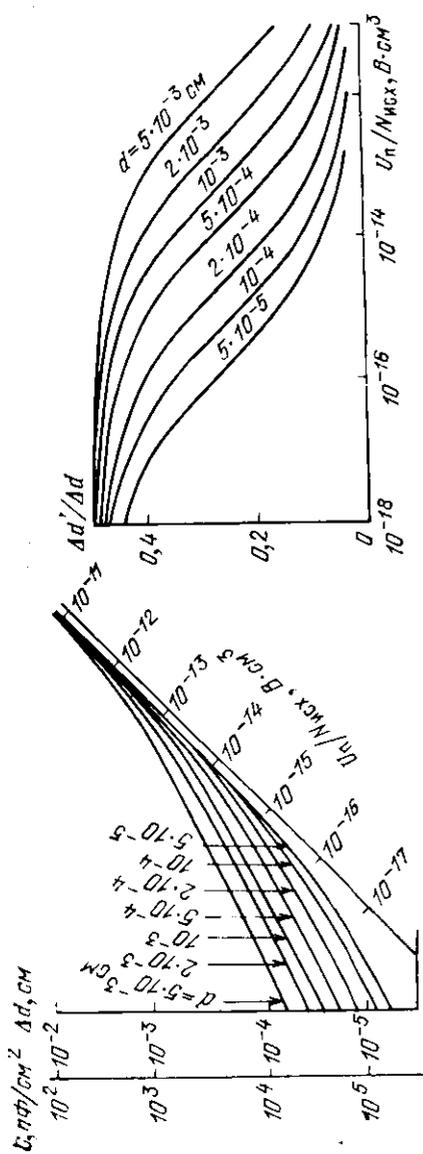


Рис. П.2. Номен-
граммы Лоурен-
са — Уорнера для
определения удель-
ной барьерной ем-
кости $p-n$ -пере-
хода, толщины
слоя простран-
ственного заряда и
распределения тол-
щин слоев по об-
ластям p - и n -ти-
пов для $N_{ср}/N_A$
равных 10^{-2} (а) и
 10^{-4} (б):
 $\Delta d'$ — толщина слоя
пространственного за-
ряда в эмиттерной
части $p-n$ -перехода

Т а б л и ц а П.3. Корпуса интегральных микросхем

Условное обозначение	Основная характеристика	Масса с подложкой, г	Размеры, мм		Число выводов
			корпуса	подложки или кристалла	
1202.14	Прямоугольный металло-стеклянный	4,5	19,5×14,5×(4—5)	16×8	14
1203.15	—>—	4,5	19,5×14,5×(3—5)	16×8	15
1211.15	—>—	7,0	22,0×19,5×5	17×15	15
1211.15	—>—	12,0	29,5×19,5×5	22×17	15
1303.36	—>—	12,0	29×19×3,6	26×16	36
1209.29	—>—	17,0	39×29×5	34×20	29
2123.14	Прямоугольный пластмассовый	1,0	19×7,2×3,2	5×3	14
2102.14	—>—	1,2	19×7,2×3,2	5×3	16
2103.16	—>—	—	—	—	—
2135.24	Прямоугольный металлокерамический	3,4	29×14,5×4	4×4	24
2204.48	Прямоугольный керамический	5,0	31×16,5×4	8×8	48
3101.08	Круглый металлостеклянный	1,5	$D=9,5, H=4,6$	3×3	8
3103.12	—>—	1,5	$D=9,5, H=4,6$	3×3	12
4104.14	Прямоугольный металло-стеклянный	1,0	10×6,6×2,2	4,9×2	14
4110.16	—>—	1,0	12,0×9,5×2,5	5,5×3,5	16
4116.24	Прямоугольный металлокерамический	1,6	19,5×12×2,6	7,5×5	24
4132.40	Прямоугольный металло-стеклянный	6,0	35,5×23,5×4,5	24×15	40
4136.48	Прямоугольный керамический	12,0	36×24×5	30×15	48
4137.50	—>—	12,0	36,5×24,5×5	30×15	50
4140.64	Прямоугольный металло-стеклянный	20,0	54,5×38,5×5	30×24	64

Примечание. D и H — внешний диаметр и высота корпуса.

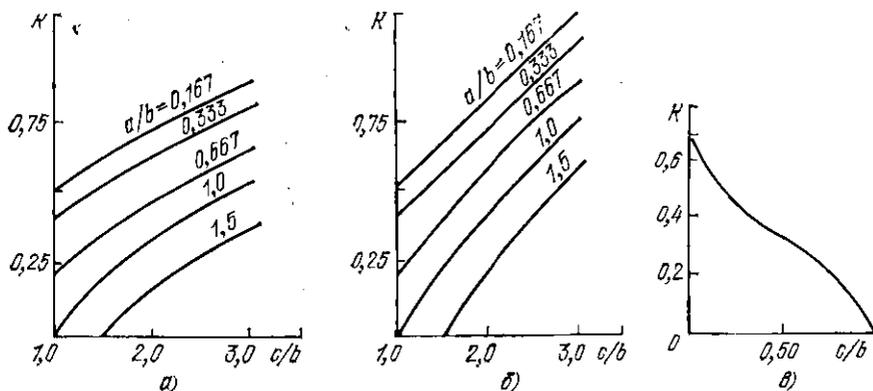


Рис. П.3. Зависимость коэффициента K , характеризующего сопротивление контактных площадок, от их геометрических размеров для контактных площадок, показанных на рис. 13.5, а (а), рис. 13.5, б (б), рис. 13.5, в (в) при $c=a$, $d=b$

Список литературы

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Сов. радио, 1980.
2. Алексенко А. Г., Шагурин И. И. Микросхемотехника. — М.: Сов. радио, 1982. — 414 с.
3. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем. — М.: Сов. радио, 1980. — 256 с.
4. Пономарев М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. — М.: Радио и связь, 1982. — 288 с.
5. Черняев В. Н. Технология производства интегральных микросхем/Под ред. А. А. Васюкова. — М.: Энергия, 1977. — 375 с.
6. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. — М.: Высшая школа, 1978. — 312 с.
7. Мазель Е. З., Пресс Ф. П. Плanaрная технология кремниевых приборов. — М.: Энергия, 1974. — 384 с.
8. Пресс Ф. П. Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем — М.: Сов. радио, 1978. — 96 с.
9. Федотов Я. А., Поль Г. И. Фотолитография и оптика. — М.: Сов. радио, 1972. — 392 с.
10. Чистяков Ю. Д., Райкова Ю. П. Физико-химические основы технологии микроэлектроники. — М.: Металлургия, 1979. — 408 с.
11. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. — М.: Высшая школа, 1972. — 352 с.
12. Технология тонких пленок: Справочник в 2-х т.: Пер. с англ./Под ред. Л. Майссела, Р. Гланта. Пер. под ред. М. И. Еллисона, Г. Г. Смолко. — М.: Сов. радио, 1977. Т. 1—664 с. Т. 2 — 768 с.
13. Донован Р. П., Смит А. М., Бэрри Б. М. Основы технологии кремниевых интегральных схем: Окисление, диффузия, эпитаксия: Пер. с англ./Под ред. В. Н. Мордковича, Ф. П. Пресса. — М.: Мир, 1969. — 451 с.
14. Легирование полупроводников ионным внедрением: Пер. с англ./У. Браун, Д. Брайс, Г. Гирли и др. Пер. под ред. В. С. Вавилова, В. М. Гусева. — М.: Мир, 1971. — 531 с.
15. Данилин Б. С., Киреев В. Н. Ионное травление микроструктур. — М.: Сов. радио, 1979. — 103 с.
16. Фомин А. В., Борисов В. Ф., Чермошенский В. В. Допуски в РЭА. — М.: Сов. радио, 1973. — 129 с.
17. Hamilton D. J., Howard W. G. Basic integrated circuit engineering. — New-York: McGraw-Hill Book Co., 1975. — 587 p.
18. Glaser A. B., Subak-Sharpe G. E. Integrated circuit engineering: Design, fabrication and applications. — Massachusetts: Addison-Wesley Publ. Co., 1977. — 811 p.
19. Hauser J. R. Fundamentals of silicon integrated device technology: Bipolar and unipolar transistors/Ed. by R. M. Burger, R. P. Donovan. — New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1968. — 480 p.
20. Матсон Э. А., Крыжановский Д. В., Петкевич В. И. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. — Минск: Высшая школа, 1979. — 192 с.
21. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: Пер. с англ./Под ред. А. Ф. Трутко. — М.: Энергия, 1973. — 655 с.
22. Интегральные схемы на МПД-приборах: Пер. с англ./У. Пенней, П. Ватц, Д. Фордмуолт и др. Пер. под ред. А. Н. Кармазинского. — М.: Мир, 1975.
23. Аналоговые и цифровые интегральные схемы/С. В. Якубовский, Н. А. Барканов, Б. П. Кудряшов и др. Под ред. С. В. Якубовского. — М.: Сов. радио, 1979. — 336 с. — (Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на интегральных микросхемах).
24. Бушминский И. П., Морозов Г. В. Конструирование и технология пленочных СВЧ микросхем. — М.: Сов. радио, 1978. — 144 с.
25. Носов Ю. Р., Петросянц К. О., Шилин В. А. Математические модели элементов интегральной электроники. — М.: Сов. радио, 1976. — 304 с.
26. Селютин В. А. Машинное конструирование электронных устройств. — М.: Сов. радио, 1977. — 384 с.
27. Баталов Б. В., Шемелин В. М. Проектирование топологии интегральных схем на ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1979. — 58 с.

Предметный указатель

- Автолегирующие эпитаксиальные
слоев 39
Автоматизация проектирования 211
— выпуска документации 219
Автопитаксия 35, 36
Базовый кристалл 205
Вакансии 19
Взрывное испарение 48
Вода бидистиллированная 14
— деионизованная 15
— дистиллированная 14
Время диффузии 134
— жизни
— задержки 184
— пролета 133
Гетероэпитаксия 35, 40
Дефекты упаковки 41
— точечные 19
— по Френкелю 19
— по Шотки 19
Диоды диффузионные 148
— Шотки 151
Диффузия из неограниченного источ-
ника 21
— из ограниченного источника 21
— локальная 4, 22
— обратная ионов 53
— разделительная 79
Длина Дебая 169
— диффузионная 126
Документация на ИС 187
— конструкторская 188
— технологическая 191
Емкость барьерная 117
— диффузионная 118
— металлизации 176
Законы Фика 18
Зонная диаграмма барьера Шотки
152
— — МДП конденсатора 168
Изоляция элементов в ИС 74
Инвертор 181
Интеграция технологических процес-
сов 8
Испарители поверхностные 49
— точечные 48
Источники диффузانتов газообраз-
ные 27
— — жидкие 26
— твердотельные 25
Катушки индуктивности 200
Коммутационная плата на основе
многослойной керамики 109
— — — полиимидной пленки 110
Конденсаторы диффузионные 159
— МДП 167
— пленочные 197
— подстраиваемые 200
Коэффициент диффузии 18, 23, 125
— инжекции 140, 145
— переноса 140, 144
— распределения (сегрегации) 46
— распыления 93
Кривизна транзистора МДП 172
— удельная 171
Метод групповой изготовления ИС 8
— навесного монтажа 84
— травления ионноплазменный 102
— — — плазмохимический 102
— трехзондовый 42
— фотонабора 72
— хлоридной эпитаксии 37
— четырехзондовый 33
Микропорошки 11
Микросборка 98, 206
Модели элементов математические
213
— — физико-топологические
Наполнители паст для толстых плен-
ок 90
Напряжение пороговое 169, 170
— пробоя 121, 132
Напыление вакуумное термическое
— высокочастотное диэлектриков
— — — ионно-плазменное
— — — реактивное катодное
Номограммы Ирвина 35
— Лоуренса—Уорнера 119, 121, 225
Омический контакт 151
Очистка поверхности 12, 94
— — — ультразвуковая 13
Параметры элементов 113, 114
Пламарный $p-n$ -переход 5
Перезарядка ионов 53
Перекрытие затвора 82, 183, 184
Пинч-резистор 165
Поверхностные состояния 170
Подвижность носителей 123
Подировка пластин кремния 11
Потенциал поверхностный 168
— температурный 118
Проводники 175, 202
Проявление фоторезиста 65
Рабочие слои 116, 117
Разброс параметров слоев 126
Разводка металлическая 175
— многослойная 106, 109, 176
Радиационные эффекты 30

- Разряд дуговой 55
- тлеющий 52
- Растворимость примесей 24
- Рекомбинация поверхностная 142
- Рентгенолучевая литография 7, 100
- Сборка кристаллов с балочными выводами 18, 102
- — с шариковыми выводами 102
- Сварка косвенным импульсным нагревом (СКПН) 96
- сдвоенным электродом 96
- лучом лазерным 96
- электрошным 96
- термокомпрессионная 83
- Сопротивление базы 138
- канала 172
- коллекторного слоя 130
- перехода 133, 154
- слоя удельное 33, 122
- Степень интеграции 205
- насыщения 130
- Средняя проекция пробега 28, 29
- Температурные характеристики 140, 144, 146, 148, 153, 160, 165, 191
- Термическое окисление 4, 44
- Технология планарная 4, 7
- изопланарная 4, 76
- Ток тепловой 125
- Топология гибридных ИС 203
- полупроводниковых ИС и БИС 178, 186, 206, 214
- Травители полирующие 16
- селективные 16
- Травление кремния анизотропное 17
- газовое 13
- Транзистор горизонтальный 145
- дрейфовый 129, 135, 140, 142
- изопланарный 208
- МДП 171, 210
- многоколлекторный 156
- паразитный 130, 144
- с барьером Шотки 155
- Трассировка 217
- Трафаретная печать 93
- Угловой эффект 54
- Уравнения базовые 114
- Уровень Ферми 151, 168
- Фоторезисты негативные 63, 64
- — позитивные 63, 64
- Фотолитография контактная 4, 63, 68
- проекционная 69
- Фотоповторитель многопозиционный 71
- Фотошаблон промежуточный 71
- металлизированный 72
- полупрозрачный 72
- Фритта 91
- Характеристические кривые фоторезисторов 65
- Частотные параметры 133, 143, 147, 153, 167
- Число Гуммеля 124, 125
- Шлифовка пластин кремния 11
- Шлиф $p-n$ -перехода косой 33
- — — шаровой 34
- Электродиффузия 107
- Электронолитография 7, 98
- Элементы паразитные 111, 176, 196
- Эллипсометрия 57
- Эпитаксия жидкостная 36
- молекулярно-лучевая 36
- Этапы конструирования 111

Оглавление

Предисловие	3
Глава 1. Основы планарной технологии	4
§ 1.1. Введение	4
§ 1.2. Структура приборов и основные процессы планарной технологии	5
§ 1.3. Особенности и преимущества планарной технологии	7
Глава 2. Обработка кремниевых подложек	9
§ 2.1. Введение	9
§ 2.2. Механическая обработка кремния	10
§ 2.3. Очистка поверхности кремния	12
§ 2.4. Травление кремния	15
Глава 3. Легирование кремния	18
§ 3.1. Введение	18
§ 3.2. Теория диффузионных процессов	20
§ 3.3. Характеристики диффузантов	23
§ 3.4. Практические способы проведения диффузии	25
§ 3.5. Легирование кремния ионным внедрением	27
§ 3.6. Методы изучения характеристик легированных слоев	33
Глава 4. Эпитаксиальное наращивание слоев кремния	35
§ 4.1. Введение	35
§ 4.2. Автоэпитаксия кремния	36
§ 4.3. Гетероэпитаксия кремния на сапфире	40
§ 4.4. Методы изучения параметров эпитаксиальных слоев	41
Глава 5. Получение тонких пленок	43
§ 5.1. Введение	43
§ 5.2. Термическое окисление кремния	44
§ 5.3. Вакуумное термическое напыление	47
§ 5.4. Ионно-плазменное напыление	52
§ 5.5. Методы определения толщины пленок	57
Глава 6. Фотолитография	63
§ 6.1. Введение	63
§ 6.2. Фоторезисты	64
§ 6.3. Технология фотолитографического процесса	66
§ 6.4. Фотошаблоны и методы их изготовления	70
Глава 7. Технологический процесс изготовления полупроводниковых интегральных микросхем	73
§ 7.1. Введение	73
§ 7.2. Методы изоляции элементов	74
§ 7.3. Типовые технологические процессы изготовления полупроводниковых интегральных микросхем	79
Глава 8. Технологические процессы изготовления тонкопленочных и толстопленочных гибридных интегральных микросхем	83
§ 8.1. Введение	83
§ 8.2. Материалы подложек	84
§ 8.3. Материалы пленок в тонкопленочных интегральных микросхемах	87
§ 8.4. Получение рисунков в тонких пленках	90
§ 8.5. Материалы для толстых пленок и методы их нанесения на подложки	91
§ 8.6. Типовые технологические процессы изготовления тонкопленочных и толстопленочных интегральных микросхем	94

Глава 9. Особенности технологии больших и сверхбольших интегральных микросхем	97
§ 9.1. Введение	97
§ 9.2. Методы получения субмикронных размеров элементов	98
§ 9.3. Ионное травление	102
§ 9.4. Многоуровневая металлическая разводка	106
§ 9.5. Многоуровневые коммутационные платы для гибридных БИС	109
Глава 10. Предмет и исходные предпосылки конструирования интегральных микросхем	111
§ 10.1. Принципы конструирования интегральных микросхем	111
§ 10.2. Типы интегральных микросхем, их элементы и компоненты	112
§ 10.3. Задачи расчета параметров элементов	113
Глава 11. Электрофизические параметры структуры интегральных микросхем	116
§ 11.1. Рабочие слои интегральных микросхем	116
§ 11.2. Удельная барьерная емкость $p-n$ -переходов	117
§ 11.3. Напряжение пробоя $p-n$ -перехода	121
§ 11.4. Удельное сопротивление слоев	122
§ 11.5. Тепловые токи $p-n$ -переходов	125
§ 11.6. Разброс параметров слоев	126
Глава 12. Проектирование биполярных транзисторов и диодов интегральных полупроводниковых микросхем	129
§ 12.1. Специфика интегральных $n-p-n$ -транзисторов	129
§ 12.2. Проектирование $n-p-n$ -транзисторов	135
§ 12.3. Расчет коэффициента передачи $n-p-n$ -транзистора	140
§ 12.4. Проектирование $p-n-p$ -транзисторов	144
§ 12.5. Проектирование интегральных диодов на основе $p-n$ -переходов	148
§ 12.6. Проектирование диодов и транзисторов с барьером Шоттки	151
§ 12.7. Проектирование многоэмиттерных $n-p-n$ -транзисторов	156
Глава 13. Проектирование пассивных элементов биполярных интегральных полупроводниковых микросхем	159
§ 13.1. Проектирование диффузионных конденсаторов	159
§ 13.2. Проектирование резисторов	161
Глава 14. Проектирование элементов МДП-интегральных полупроводниковых микросхем	167
§ 14.1. Проектирование МДП-конденсаторов	167
§ 14.2. Проектирование МДП-транзисторов	171
§ 14.3. Проектирование межэлементных соединений	175
Глава 15. Конструирование полупроводниковых интегральных микросхем	178
§ 15.1. Разработка топологии полупроводниковых интегральных микросхем	178
§ 15.2. Разработка топологии цифровых интегральных микросхем на МДП-транзисторах с каналами одного типа проводимости	181
§ 15.3. Особенности проектирования топологии аналоговых интегральных микросхем с дифференциальным каскадом на входе	186
§ 15.4. Документация на интегральные микросхемы	187
Глава 16. Конструирование гибридных интегральных микросхем	191
§ 16.1. Проектирование пленочных элементов гибридных интегральных микросхем	191
§ 16.2. Разработка топологии гибридных интегральных микросхем	203

Глава 17. Конструирование больших интегральных микросхем	205
§ 17.1. Особенности конструирования	205
§ 17.2. Особенности структуры элементов	206
§ 17.3. Задачи машинного конструирования	211
§ 17.4. Физико-топологические модели элементов	212
§ 17.5. Математические модели элементов	213
§ 17.6. Машинная разработка топологии	214
§ 17.7. Машинная разработка конструкторской документации	219
Приложение	223
Список литературы	227
Предметный указатель	228

*Андрей Сергеевич Березин
Ольга Романовна Мочалкина*

**ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ**

Редактор *М. М. Лисина*
Художник *В. П. Карпов*
Художественный редактор *Н. С. Шейн*
Технический редактор *Л. А. Горшкова*
Корректор *Л. С. Глаголева*

ИБ № 520

Сдано в набор 22.12.82.	Подписано в печать 11.03.83.
Т-04680	Формат 60×90/16
Печать высокая	Усл. печ. л. 14,5
Изд. № 19739	Усл. кр.-отт. 14,5
Издательство «Радио и связь».	Уч.-изд. л. 16,61
101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693	Тираж 45 000 экз.
	Зак. № 165
	Цена 80 к.

Типография издательства «Радио и связь» Госкомиздата СССР
101000 Москва, ул. Кирова, д. 40