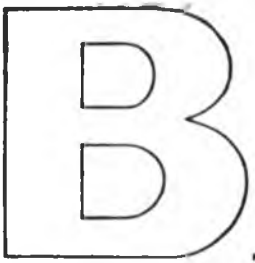


И.Г.Блинов
Л.В.Кожитов

ОБОРУДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов приборостроительных специальностей вузов

МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1986

ББК 30.605
Б69
УДК 621.382.005

Рецензенты: 1. Кафедра Минского радиотехнического института; зав. кафедрой д-р. техн. наук, проф. В. А. Лабунов. 2. Д-р техн. наук, проф. В. К. Попов.

Блинов И. Г., Кожитов Л. В.

Б69 Оборудование полупроводникового производства: Учебное пособие для студентов вузов. — М.: Машиностроение, 1986.— 264 с., ил.

(В пер.): 1 р.

В учебном пособии изложены вопросы конструирования и особенности основных видов технологического оборудования полупроводникового производства. Сформулированы требования к оборудованию, определяемые технологическими процессами, и даны практические рекомендации по их реализации.

Наряду с рассмотрением отдельных видов устройств отмечена необходимость системного подхода к комплексной механизации и автоматизации производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, изучающих оборудование полупроводникового производства в курсах «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» и «Технология специальных материалов электронной техники». Оно также может быть использовано студентами специальности «Полупроводниковое и электровакуумное машиностроение».

Б $\frac{2403000000\text{-}019}{038(01)\text{-}86}$ 19-86

ББК 30.605
6П3.2

© Издательство «Машиностроение», 1986 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 6
Введение 8

Глава 1. **Оборудование производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем** 12

1. Особенности полупроводникового производства и их влияние на конструкцию оборудования 12
2. Основные стадии производства и классификация оборудования 17
3. Тенденции в разработке оборудования полупроводникового производства 19

Глава 2. **Виды нагрева в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем** 25

1. Требования к системе нагрева изделий 25
2. Индукционный нагрев 25
3. Резистивный нагрев 29
4. Электронно-лучевой нагрев 34
5. Лучистый нагрев 40
6. Плазма и ее использование в ионно-плазменных процессах и ионно-лучевых источниках 43
7. Нагрев лазером 49

Глава 3. **Средства получения вакуума и расчет вакуумных систем** . 52

1. Вакуумная система и ее элементы 52
2. Классификация вакуумных насосов и их характеристики . . . 54
3. Механические насосы с масляным уплотнением 55
4. Средства получения высокого вакуума 56
5. Откачка химически активных газов 64
6. Методика проектирования вакуумной системы 65
7. Пример расчета вакуумной системы 68

Глава 4. **Газовые системы оборудования полупроводникового производства** 73

1. Классификация газовых систем и требования к ним 73
2. Аппаратура и элементы газовых систем 74
3. Конструирование газовых систем 83

Глава 5. **Оборудование для выращивания монокристаллов полупроводников** 87

1. Классификация кристаллизационных процессов выращивания монокристаллов полупроводников 87
2. Конструкция установки для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского 88
3. Конструкции тепловых узлов установок для выращивания монокристаллов полупроводников 90
4. Влияние параметров процесса выращивания монокристаллов на их свойства 95

5. Автоматическая система управления процессом выращивания монокристаллов 99

Глава 6. **Оборудование для резки слитков и механической обработки пластин полупроводниковых материалов** 101

1. Оборудование для кристаллографической ориентации слитков . 101
2. Оборудование для резки монокристаллов полупроводниковых материалов 103
3. Оборудование для шлифования и полирования пластин . . . 109
4. Оборудование для химической и электрохимической обработки полупроводниковых пластин 114
5. Оборудование для контроля полупроводниковых пластин . . . 116

Глава 7. **Оборудование для очистки поверхностей полупроводниковых приборов и интегральных микросхем** 119

1. Особенности технологии очистки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем 119
2. Оборудование для операций очистки 121
3. Функциональные элементы оборудования для очистки . . . 124
4. Способы интенсификации процесса очистки 129
5. Оборудование для очистки с применением низкотемпературной плазмы, радикалов и ионов 135

Глава 8. **Оборудование для диффузии и окисления** 139

1. Требования к оборудованию для диффузии и окисления . . . 139
2. Конструкции термических камер диффузионных печей . . . 143
3. Система автоматического регулирования температуры . . . 145
4. Элементы диффузионной системы 147
5. Основные направления в создании оборудования для диффузии и окисления 149

Глава 9. **Оборудование для процессов ионной имплантации** . . . 152

1. Сущность процесса ионной имплантации и классификация оборудования 152
2. Элементы систем ионной имплантации 154
3. Тенденции в разработке оборудования для ионной имплантации 156

Глава 10. **Оборудование для газовой эпитаксии** 158

1. Требования к установкам для газовой эпитаксии 158
2. Реакторы для газовой эпитаксии 158
3. Оборудование для эпитаксиального наращивания полупроводниковых соединений типа $A^{III} — B^{V}$ 166
4. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) наращивания эпитаксиальных структур . . . 167
5. Тенденции в развитии оборудования для газовой эпитаксии . . 169

Глава 11. **Оборудование для жидкофазной эпитаксии** 171

1. Классификация методов жидкофазной эпитаксии и требования к оборудованию 171
2. Аппаратурное оформление жидкофазной эпитаксии 172

Глава 12. **Оборудование для процессов фотолитографии** 175

1. Основные сведения о фотолитографии 175
2. Оборудование для формирования фотослоя 176
3. Оборудование для совмещения и экспонирования 181
4. Оборудование для проявления фоторезиста 189
5. Оборудование для травления окисла и металла 192
6. Перспективы разработки оборудования для литографических процессов 193

Глава 13. **Оборудование для осаждения пленок в вакууме** . . . 197

1. Оборудование для осаждения пленок термическим испарением в вакууме 197
2. Оборудование для катодного распыления материалов 205
3. Оборудование для ионно-плазменного напыления 210

Глава 14. **Монтажно-сборочное оборудование** 213

1. Область применения и классификация оборудования для сборки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем . . 213
2. Требования к монтажно-сборочному оборудованию 216
3. Типовые конструкции основных узлов монтажно-сборочного оборудования 217
4. Способы и средства контроля качества соединений в интегральных микросхемах 224
5. Пути и методы повышения производительности монтажно-сборочного оборудования 227

Глава 15. **Автоматические поточные линии и автоматизированные технологические комплексы** 230

1. Особенности комплексной механизации и автоматизации производства интегральных микросхем 230
2. Виды поточных линий 232
3. Структурная и конструктивная компоновка автоматических линий 235
4. Автоматизированные поточные линии для производства интегральных микросхем и полупроводниковых приборов 236

Глава 16. **Промышленные роботы в производстве полупроводниковых приборов и микросхем** 247

1. Области применения промышленных роботов 247
2. Характеристики и назначение основных систем промышленных роботов 247
3. Требования к роботам, предназначенным для применения в чистых помещениях 252

Список литературы 256

Предметный указатель 259

ПРЕДИСЛОВИЕ

Оснащенность производства современными машинами и оборудованием в большой степени определяет эффективность его функционирования. Это относится к любому производству, а в особенности к производству полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Последнее обусловлено тем, что при производстве полупроводниковых приборов используются машины, в которых реализованы новейшие достижения современной науки: имплантации легирующих примесей с помощью ионных пучков, литография с применением электронных и рентгеновских пучков, отжиг и резка подложек с использованием лазеров, а также очистки и травления с помощью плазмы и т. д. Все эти новые методы обработки потребовали разработки соответствующего оборудования.

Технология производства дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем представляет собой сложный комплекс разнообразных технологических процессов, требующих для их реализации создания специализированных машин. Разработка таких машин — процесс комплексный. В нем участвуют не только конструкторы, но и технологи и разработчики микросхем. Все они должны быть знакомы с возможностями и достижениями в смежных областях техники. Поэтому в учебном пособии, предназначенном для студентов, изучающих курсы «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» и «Технология специальных материалов электронной техники» и посвященном оборудованию полупроводникового производства, затронуты вопросы технологии производства микросхем в объеме, необходимом для понимания тесной взаимосвязи оборудования и реализуемого на нем технологического процесса. Подчеркивается, что необходимость комплексного, системного подхода к оснащению полупроводникового производства технологическим оборудованием и переход от создания отдельных машин и технологических процессов к разработке систем машин и технологий, обеспечивающих высокий уровень автоматизации как основных, так и вспомогательных операций — генеральное направление в автоматизации полупроводникового производства.

В книге в гл. 1—4 рассмотрены особенности полупроводникового производства и общие вопросы конструирования и расчета элементов технологического оборудования.

В гл. 5—13 приведены основные виды машин и установок, используемых в полупроводниковом производстве.

Заключительные гл. 14, 15 и 16 посвящены вопросам комплексной механизации и автоматизации производственных процессов в производстве полупроводниковых приборов и микросхем, а также даны примеры автоматизированных технологических линий и применения промышленных роботов. Особо рассмотрена возможность использования типовых конструкций роботов и проблемные вопросы их создания для эксплуатации в чистых помещениях.

Книга является первым учебным пособием по оборудованию полупроводникового производства, предназначенным для студентов вузов и возможно не лишена недостатков.

Предисловие, введение и главы 1, 6, 7, 12, 13, 15 и 16 написаны И. Г. Блиновым, а главы 2—5, 9—11 и 13 Л. В. Кожитовым. Глава 8 написана авторами совместно.

Все замечания и пожелания читателей по содержанию книги, которые авторы примут с благодарностью, просим направлять по адресу: 107076, Москва, Стромынский пер.. 4. Изд-во «Машиностроение».

ВВЕДЕНИЕ

Развитие полупроводникового производства связано с изобретением в конце сороковых годов точечно-контактного транзистора.

В дальнейшем совершенствование конструкции полупроводниковых приборов шло параллельно с разработкой нового технологического оборудования, методов выращивания и очистки монокристаллов, необходимых для изготовления плоскостных транзисторов.

Весьма важным моментом в области технологии полупроводниковых приборов явилась разработка в 1957 г. планарного процесса, основанного на локальном легировании полупроводниковой подложки с использованием оксидной маски, профилированной методом фотолитографии. Реализация этого процесса в производстве потребовала создания большой группы новых прецизионных оптико-механических устройств.

Разработка методов окисного маскирования и фотолитографии, составляющих основу планарной технологии, позволили на их базе создать не только полупроводниковые приборы, но и интегральные микросхемы.

Применение одинаковых материалов и технологических методов обработки при производстве как полупроводниковых приборов, так и интегральных микросхем, в значительной мере обусловливает и использование однотипного оборудования. Однако, как правило, требования к прецизионности оборудования для производства интегральных микросхем по некоторым параметрам несколько выше, чем для дискретных полупроводниковых приборов.

Все возрастающие потребности в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах определили и основное направление в развитии технологии их производства — совершенствование групповых методов обработки при увеличении числа одновременно обрабатываемых пластин и числа кристаллов на пластинах. Оба эти направления оказывают непосредственное воздействие на развитие и совершенствование конструкций технологических машин и установок.

Так, например, увеличение числа одновременно обрабатываемых пластин привело к увеличению габаритных размеров и повышению точности станков для шлифования и полирования, поиску

путей получения пластин необходимых геометрических размеров и форм.

Особенно заметно влияет на технические характеристики оборудования увеличение размера партии одновременно обрабатываемых пластин на операциях эпитаксиального наращивания пленок и диффузии. Это связано со сложностью организации газодинамического потока и распределением температурных полей в реакционных камерах установок, обеспечивающих необходимое качество обработки.

Для обеспечения заданного времени откачки и поддержания необходимого вакуума в процессе нанесения пленки потребовалось создать новые быстродействующие и малогабаритные средства откачки, а также новые типы испарителей и средства очистки подложек.

Не менее сложные проблемы возникли и при внедрении ряда групповых методов химической обработки. Так, потребовалась жесткая стабилизация режимов обработки на предшествующих операциях, что в свою очередь облегчило решение проблемы автоматизации всех операций травления.

Другим направлением в развитии технологии групповых методов производства, связанным с увеличением числа кристаллов на обрабатываемой пластине, является увеличение размера исходной пластины-заготовки.

С улучшением и освоением новых технологий операций фотолитографии и выращивания бездефектных монокристаллов кремния создавались и новые поколения оборудования для производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Все операции технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем достаточно ответственны, но, не имея высококачественного исходного материала, нецелесообразно приступать к изготовлению комплектующих элементов. В качестве исходного материала используют монокристаллический слиток диаметром от 10 до 150 мм, длиной от 40 до 2000 мм и содержащий примесей 10^{-3}—10^{-10} %. Получение бездефектных по кристаллической структуре и столь чистых слитков большого диаметра представляет собой трудную задачу.

Но, пожалуй, еще более сложная задача — обеспечение с помощью фотолитографии топологии рисунка элементов полупроводниковых приборов и особенно микросхем на пластинах большого диаметра, подвергающихся многократной термической обработке и изменяющих вследствие этого свои геометрические параметры. Эта задача осложняется еще и тем, что полученную топологию элементов необходимо сохранить в процессе дальнейшей обработки пластин.

В производстве полупроводниковых приборов и микросхем наряду с групповыми методами обработки широко распространены и методы индивидуальной или поштучной обработки изделий, особенно на операциях сборки и испытания приборов. В этом случае

совершенствование оборудования и повышение производительности осуществляется традиционными методами автоматизации.

Современное полупроводниковое производство — комплекс сложнейших операций от входного контроля исходных материалов до окончательной сборки готового прибора, его испытания и упаковки. При изготовлении полупроводникового прибора или микросхемы (в зависимости от их сложности) необходимо выполнить десятки и даже сотни технологических и контрольно-измерительных операций, требующих применения специального оборудования. Так, для изготовления только одного достаточно простого в технологическом отношении типа полупроводникового прибора — диффузионного кремниевого диода — необходимо применение более 80 единиц специального оборудования, не считая универсальных и типовых станков, применяемых на заготовительных операциях.

Высокие требования к технологии и оборудованию определяются специфическими особенностями полупроводникового прибора как изделия. Важнейшая из них заключается в том, что весь процесс изготовления прибора протекает в объеме одного кристалла, в котором приходится создавать слои или области с особыми физическими свойствами. Кристалл — основа прибора. От его качества зависят все важнейшие электрические характеристики готового изделия.

В последние годы в промышленности наметилась тенденция замены полупроводниковых приборов, как дискретных изделий, интегральными микросхемами. Это вызвано стремлением повысить надежность и уменьшить габаритные размеры и массу радиотехнических устройств, создаваемых с применением полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Таким образом, современное полупроводниковое производство специализируется на выпуске двух групп изделий — дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Несмотря на интенсивное развитие производства интегральных микросхем и увеличение их доли в общем объеме выпуска полупроводниковых изделий, выпуск дискретных полупроводниковых приборов, по-видимому, сохранится еще длительное время.

Изготовление дискретных полупроводниковых приборов по планарной технологии может осуществляться практически на любом оборудовании, предназначенном для выпуска интегральных микросхем с добавлением некоторых специальных устройств для сборки и испытаний. Производство микросхем, современных больших интегральных (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС) целиком зависит от освоения новых видов оборудования.

Переход в эру БИС и особенно в эру СБИС — это переход в эру субмикронных размеров. Современная СБИС на кристалле размером примерно 5×5 мм имеет до 10^5—10^6 элементов с размерами линий 1—3 мкм.

Создать и реализовать такие микросхемы в производстве можно только с применением новейших видов машин, таких как

установки ионной имплантации, лазерного отжига, электронно-лучевой и рентгеновской литографии, ионного и плазмохимического травления и т. д. Естественно, что человек уже не в состоянии управлять столь сложными и быстропротекающими процессами и здесь незаменимыми становятся средства автоматики и ЭВМ для управления технологическими процессами.

Таким образом, разработка высокоавтоматизированного оборудования с управлением от ЭВМ с целью реализации в полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах субмикронных размеров элементов является основной задачей современного машиностроения для полупроводникового производства.

ГЛАВА 1

ОБОРУДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. ОСОБЕННОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОНСТРУКЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ

Высокие требования, предъявляемые к ряду конструктивных параметров оборудования полупроводникового производства, определяются специфическими особенностями технологии изготовления и конструкции полупроводниковых приборов.

Важнейшая из них заключается в том, что весь процесс получения главного элемента прибора, определяющего все его функциональные возможности, — кристалла с $p-n$-структурой, является результатом выполнения ряда последовательных операций с целью создания внутри объема кристалла слоев или областей с особыми физическими свойствами. Кристалл представляет собой одну деталь, в отличие от разъемных конструкций в приборостроении, заменить в нем неправильно изготовленный элемент нельзя и брак только на одной операции приводит к браку кристалла в целом.

Сложность и высокая трудоемкость межоперационного контроля технологических операций, выполняемых при изготовлении кристаллов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, побуждают производственников сокращать количество контрольных операций, оставлять их только в узловых точках технологического процесса (после проведения фотолитографии, диффузии и т. п.). При этом, естественно, возрастают требования к оборудованию в отношении стабильности и воспроизводимости параметров технологического процесса с целью обеспечения необходимого процента выхода готовых изделий. Обеспечить эти требования можно только за счет высокой степени автоматизации технологического процесса.

Так, например, при создании в СВЧ-транзисторе диффузионного слоя толщиной 0,2 мкм (при допустимом разбросе $\pm 10\ \%$) точность, с которой необходимо выдерживать глубину диффузии, составит $\pm 0{,}02$ мкм. Это определяет необходимые точности поддержания температурных режимов, газовых потоков и концентрации легирующих примесей, что обеспечить без устройств автоматики практически невозможно.

Миниатюрные размеры деталей полупроводниковых приборов, и особенно активных элементов и областей в кристаллах, определяют исключительно высокие требования к прецизионности механических устройств некоторых видов оборудования, таких как фотолитографическое и сборочное. Необходимо применение и созда-

ние оптических приборов и механических устройств, обеспечивающих осуществление и наблюдение микроперемещений с точностью 0,5÷1,0 мкм и менее. Например, при изготовлении фотошаблонов и для обеспечения необходимого совмещения очередного шаблона с рисунком, ранее нанесенным на полупроводниковую пластину, разрешающая способность оптических устройств должна достигать 1000 линии/мм и более, а у экспонируемых материалов — до 1500 линии/мм. В то же время и стол с закрепленной на нем заготовкой фотошаблона или пластиной должен обеспечивать перемещение с точностью до долей микрометра на относительно большом поле размером 150×150 мм.

На сборке высококачественных приборов производится присоединение выводов диаметром порядка 10 мкм к контактным площадкам размером 20×70 мкм, а наблюдение за манипуляциями прецизионными инструментами при этом непрерывно ведется через микроскоп с достаточно большим увеличением. Дополнительные сложности автоматического ориентирования, транспортировки, обработки, совмещения возникают на сборочных операциях в связи с тем, что изделия обладают повышенной хрупкостью, повреждаемой поверхностью и общими малыми геометрическими размерами.

Толщина линий, получаемых на полупроводниковой пластине после литографии, становится соизмеримой с размерами пылевых частиц, находящихся в воздухе цеха. Поэтому попадание пылевой частицы на полупроводниковую пластину может привести к перекрытию соседних линий и браку прибора.

Необходимость обеспечения сверхчистых стабильных производственных условий определяет высокую стоимость строительства и эксплуатации производственных помещений для полупроводникового производства и увеличивает затраты при проектировании оборудования, ограничивает выбор конструкционных материалов, затрудняет автоматизацию и механизацию процессов, усложняет организацию межоперационного транспортирования и хранения полуфабрикатов. Часто технологические процессы проводятся в вакууме или в среде защитного газа, подвергаемого специальной очистке. В городском воздухе содержится примерно 10^5 взвешенных частиц в 1 л. В помещениях, где изготавливаются интегральные микросхемы, запыленность должна быть уменьшена более чем в $3 \cdot 10^4$ раз. Ряд операций производства интегральных микросхем должен производиться в герметизированных помещениях 1 класса чистоты и категории микроклимата в соответствии с нормами, приведенными в табл. 1 и табл. 2.

Для снижения расходов на фильтрацию воздуха полупроводниковые предприятия располагают в зеленых зонах вне города. При планировке помещений используют принцип «куб в кубе», когда помещение с наиболее жесткими требованиями по чистоте размещают внутри гермозоны с обеспыленной средой.

Большое количество пыли выделяется за счет истирания полов в производственных помещениях: если с поверхности пола

Таблица 1. **Классификация производственных помещений по чистоте воздушной среды**

Класс чистоты помещения	Максимальное количество частиц и аэрозолей пыли в воздухе размером более 0,5 мкм	
	в 1 м³	в 1 л
1	$4 \cdot 10^3$	4
2	$3{,}5 \cdot 10^4$	35
3	$3{,}5 \cdot 10^5$	$3{,}5 \cdot 10^2$
4	$3{,}5 \cdot 10^7$	$3{,}5 \cdot 10^3$
5	По санитарным нормам СН-245-71	

Таблица 2. **Классификация производственных помещений по микроклимату**

Категория микроклимата	Температура, °С		Относительная влажность, %
	зимой	летом	
I	21±1	23±1	45±5
II	20±2	23±2	45±5
III	По СН 245-71		

размером в 1 см² стереть слой толщиной в 1 мкм, то из этого объема материала может образоваться около 10^8 пылинок со средним размером 1 мкм³.

Загрязнения, попадающие в слой фоторезистора при фотолитографии или непосредственно в окисел при окислении, могут привести к появлению дефектов маскирующего слоя. Чтобы плотность дефектов не превышала 0,04 мм$^{-2}$, в 1 л воздуха допустимо содержание не более 4 частиц со средним размером 1 мкм. Для обеспечения и поддержания чистоты на уровне этих требований применяют герметизацию помещений, а стены, полы и потолки выполняют из несобирающих пыль и трудно истирающихся материалов, т. е. создают так называемые «гермозоны», в которые мощными кондиционерами нагнетается очищенный фильтрами от пыли воздух. Все работающие в гермозоне обязательно перед входом в нее переодеваются в спецодежду, не выделяющую пыли (ворсинок ткани). Вход посторонних людей в нее ограничен. Но даже этих мер бывает недостаточно для соблюдения необходимых требований по вакуумной гигиене. В этих случаях внутри гермозон устанавливают чистые комнаты.

Чистая комната, схематическое изображение которой показано на рис. 1, представляет собой помещение с ламинарным потоком дополнительно профильтрованного воздуха. В чистой комнате выполняются технологические операции, наиболее чувствительные к содержанию различных частиц в воздухе помещения.

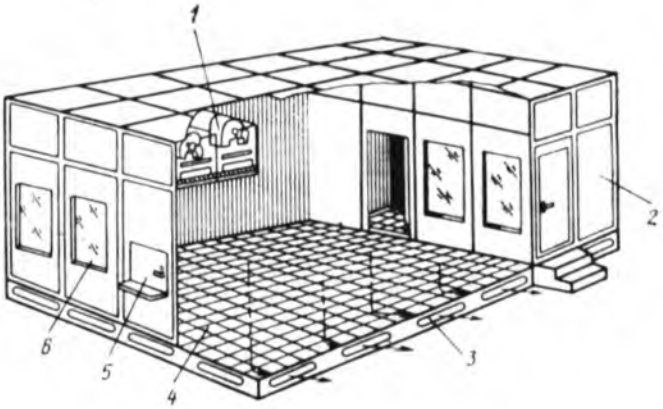


Рис. 1. Общий вид чистой комнаты:
1 — нагнетатель воздуха; *2* — тамбур; *3* — окно для выхода воздуха; *4* — перфорированный пол; *5* — шлюз; *6* — окно для пристыковки оборудования

Иногда для этих же целей применяют пылезащитные козырьки или камеры (см. рис. 2 и 3).

Во всех случаях использования пылезащитных устройств предъявляют следующие дополнительные требования к оборудованию:

оно не должно являться сборником пыли, которую потом трудно удалить и, тем более, само не должно выделять ее в процессе работы.

должно легко встраиваться в стенки чистых комнат и пылезащитных камер таким образом, чтобы можно было отделить «чистую» зону (зону обработки полупроводниковых пластин) от «грязной» (от зоны обслуживания механизмов машины).

позволять транспортировку изделий в герметичных контейнерах, раскрываемых только на позициях обработки.

Кроме того, транспортные внутриагрегатные конвейерные системы должны исключать возможность загрязнения обрабатываемых изделий при передаче их с позиции на позицию.

Наряду с этим функциональные узлы технологического оборудования должны надежно работать в условиях высокой температуры, вакуума и при воздействии паров жидкостей агрессивных химических реагентов.

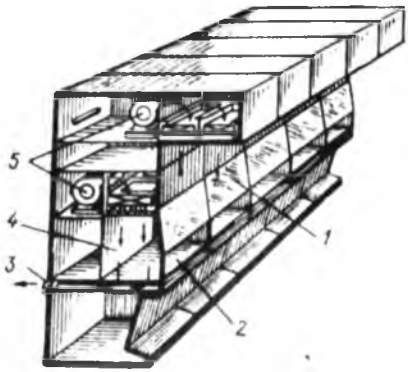


Рис. 2. Конструктивная схема открытой пылезащитной линии:
1 — защитное стекло; *2* — стол; *3* — вытяжной воздуховод; *4* — обеспыленная камера; *5* — нагнетатели воздуха

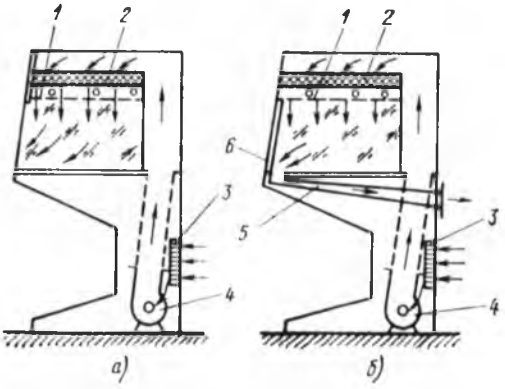


Рис. 3. Пылезащитные камеры с вертикальным ламинарным потоком воздуха для выполнения операций:

а — без выделения продуктов химических реакций; *б* — с выделением продуктов химических реакций;
1 — перфорированная решетка; *2* — высокоэффективный фильтр; *3* — воздухозаборная решетка; *4* — вентилятор; *5* — воздуховод для удаления загрязненного воздуха; *6* — подъемная шторка

К химическим реактивам, моющим растворам, технологическим средам и легирующим составам предъявляют повышенные требования в отношении их чистоты, т. е. они должны иметь минимальное количество примесей, соизмеримое с количеством примесей в исходном полупроводниковом материале. Реакторы, в которых размещают обрабатываемые изделия, выполняют из особо чистых конструкционных материалов. Перед началом каждого процесса внутреннюю поверхность реактора подвергают специальной обработке с целью его стерилизации. Высокие требования предъявляют также к личной гигиене обслуживающего персонала.

Важной отличительной особенностью полупроводникового производства является расчлененность производства в пространстве, многоагрегатность, многономенклатурность вспомогательных материалов, многооперационность, наличие большого числа изделий в заделе.

Длительность технологического процесса изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, вызванная прохождением изделием большого числа технологических процессов и операций в строго заданной последовательности различной длительностью технологических операций и различным коэффициентом выхода годных изделий на каждой из них, затрудняют возможность согласования по производительности каждого технологического участка производства с производительностью всего комплекса технологического оборудования.

Непрерывная миниатюризация полупроводниковых приборов и интегральных микросхем приводит к постоянному повышению требований по точности обработки и совершенствованию технологических процессов. Дальнейшая интеграция элементов на кристалле приводит к увеличению его размеров. Это вызывает не только постоянное возрастание требований к прецизионности оборудования, но требует качественно новых технических решений в построении технологических процессов и оборудования.

Важное место в производстве полупроводниковых приборов и особенно микросхем отводится операциям контроля их качества и надежности при помощи прямых и косвенных измерений многочисленных и сложных параметров.

Трудоемкость контрольных операций составляет до 30—40 % трудоемкости изготовления изделия, так как в большинстве случаев применяется 100 %-ный пооперационный контроль. Весьма велика трудоемкость контрольно-испытательных операций готовых изделий, что связано с многономенклатурностью производства и необходимостью сортировки приборов по группам с различными параметрами после окончательного их изготовления.

2. ОСНОВНЫЕ СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Технологический процесс производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем можно разбить на три самостоятельные стадии. Поэтому возможна и уже реализована специализация предприятий по каждому из этих направлений.

Первая стадия — заготовительная. В цехах и на участках этого производства обеспечивается выпуск слитков полупроводниковых материалов, кремниевых пластин, металлических деталей, металлостеклянных и металлокерамических узлов, корпусов, специального инструмента и т. п. Предприятия этого типа содержат цехи и участки выращивания и очистки монокристаллов, холодной штамповки, стеклозаготовительные, керамические, гальванических покрытий, термической, оптико-механической и фотолитографической (для фотошаблонов) обработки.

Вторая стадия — структурообразующая. В цехах и на участках этого производства осуществляется создание внутри объема полупроводникового кристалла слоев или областей с особыми физическими свойствами. Имеются участки окисления и диффузии, фотолитографии, ионной имплантации, технохимической обработки, вакуумного нанесения пленок, плазмохимической обработки межоперационного контроля и получения эпитаксиальных структур. Последний иногда может быть выделен в самостоятельное производство.

Третья стадия — сборочно-контрольная. На этой стадии производится сборка приборов в металлостеклянные, металлокерамические и пластмассовые корпуса на участках подготовки кристаллов, монтажа его в корпус, приварки выводов, герметизации и контроля. Выполняются и завершающие операции, такие как классификация, механические и климатические испытания, окраска, маркировка и упаковка готовых изделий.

Анализ производства показывает, что оборудование, используемое на первой и третьей стадиях изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, имеет много общего между собой в отношении организации технологического процес-

са и условий эксплуатации. Для этих стадий характерны: слабые связи между технологическими участками и отдельными видами оборудования, практически неограниченное время межоперационного хранения полуфабрикатов, относительно невысокие, за исключением участка производства фотошаблонов, требования к вакуумной гигиене (2-й — 3-й классы помещений по климатическим параметрам и 3-й — 5-й классы по запыленности воздуха). Организация производства на этих стадиях не имеет принципиальных отличий от производств, например, в электровакуумной, радиотехнической или приборостроительной промышленности. В условиях массового выпуска деталей на основных участках этих производств возможно применение механизированных и автоматических линий. При этом возможно создание межоперационных заделов; что способствует организации регулярного потока изделий и ритмичной работе автоматической линии.

Вторая, структурообразующая стадия по организации производства и условиям эксплуатации оборудования резко отличается от первой и третьей. Ее выделяют в особый вид производства, характерные особенности которого присущи только изготовлению полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Причинами этого являются:

сильные связи между участками, обусловленные цикличностью технологического процесса, т. е. многократным возвращением пластин на участки для повторных обработок;

ограничение времени межоперационного хранения обработанных пластин;

высокие требования к вакуумной гигиене;

нерегулярный характер перемещения изделий между участками, обусловленный значительным разбросом в длительности операции и переменным по потоку коэффициентом выхода годных изделий.

Таким образом, комплексы оборудования, предназначенные для использования на разных стадиях полупроводникового производства, существенно отличаются друг от друга и по сложности и по закономерностям их функционирования. Эти отличия обусловлены отмеченными выше особенностями изготовления и хранения деталей, требованиями производственной гигиены, порядком поступления изделий на обработку.

Основные группы технологического и контрольно-испытательного оборудования, необходимого для производства интегральных микросхем по наиболее распространенной сейчас планарно-эпитаксимальной технологии, показаны на рис. 4. Для реализации других технологических процессов, применяемых в производстве, например точечных или сплавных приборов, потребуется другое оборудование. Из рис. 4 видно, насколько широка номенклатура оборудования, применяемого в полупроводниковом производстве. Кроме того, можно отметить, что все применяемое оборудование специально создано для использования в полупроводниковом производстве.

Рис. 4. Основные группы технологического и контрольно-испытательного оборудования для производства интегральных микросхем

3. ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Бурное развитие микроэлектроники вызвало появление новых технологических процессов и новых видов оборудования для их реализации. В этих технологических процессах наряду с оптимизацией процесса проведения отдельных операций стремятся уменьшить общее число технологических операций и повысить степень их однородности для последующей их интеграции и автоматизации технологического цикла. При этом предполагают получить увеличение выхода годных изделий не только за счет улучшения какой-либо одной, пусть даже самой несовершенной технологической операции, сколько в результате оптимизации всего технологического цикла изготовления микросхем.

Главной задачей оснащения полупроводникового производства оборудованием является осуществление перехода от создания и внедрения отдельных машин к разработке и внедрению систем машин, обеспечивающих высокий уровень автоматизации как основных технологических процессов, так и вспомогательных операций (транспортирование, загрузка и выгрузка изделий и т. п.). Причем, решая техническую задачу для части отдельной машины или устройства, входящего в систему машин, имеют в виду необходимость обеспечения высокого качества функционирования системы в целом. Такой системный подход позволяет провести анализ и синтез разных по своей природе и сложности объектов, в виде основного и вспомогательного оборудования, выявить важнейшие характерные черты функционирования конкретной системы, линии или участка и учесть наиболее существенные для работы всей системы факторы. Использование системного подхода позволяет выявить множество факторов самого различного характера и выделить из них те, которые оказывают на объект наибольшее влияние в отношении общесистемных целей, найти пути и методы эффективного воздействия на эти факторы. Поэтому системный подход стремятся использовать как метод, представляющий собой важнейший инструмент при создании высокоавтоматизированных технических систем.

Под технической системой мы понимаем систему, состоящую из машин и агрегатов и представляющую собой взаимосвязанный, сбалансированный по производительности и необходимым образом расположенный в пространстве комплекс основного технологического и вспомогательного оборудования, обеспечивающий решение определенной производственной задачи.

Техническая система определяет производственные мощности предприятия, с помощью которых в процессе производства выпускается продукция в определенном количестве и соответствующего качества. Место технической системы среди других систем предприятия показано на рис. 5.

Необходимо отметить, что техническая система цеха или предприятия включает в себя три важнейших системы низшего порядка: технологических машин и механизмов, энергетических машин и управляющих машин.

На современном предприятии техническое решение производственной задачи, стоящей перед каждым отдельно взятым участком или цехом, не может рассматриваться как полноценное при отсутствии любого из этих компонентов технической системы.

В зависимости от степени автоматизации производства содержание этих составляющих будет различным. Все это хорошо иллюстрируется схемой, определяющей иерархические уровни и составляющие элементы технической системы предприятия, показанной на рис. 6. В зависимости от поставленной цели при создании машин, стоящих на соответствующем иерархическом уровне, необходимо учитывать все требования, определяемые агрегатами, стоящими на более высоком иерархическом уровне, ко всем вхо-

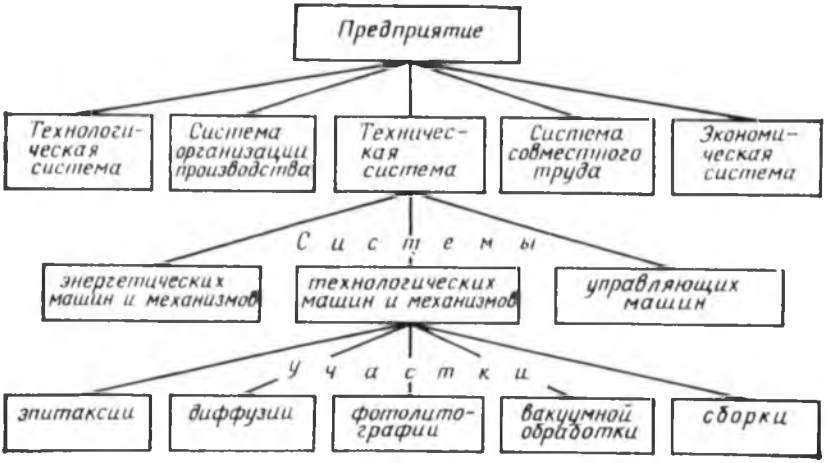
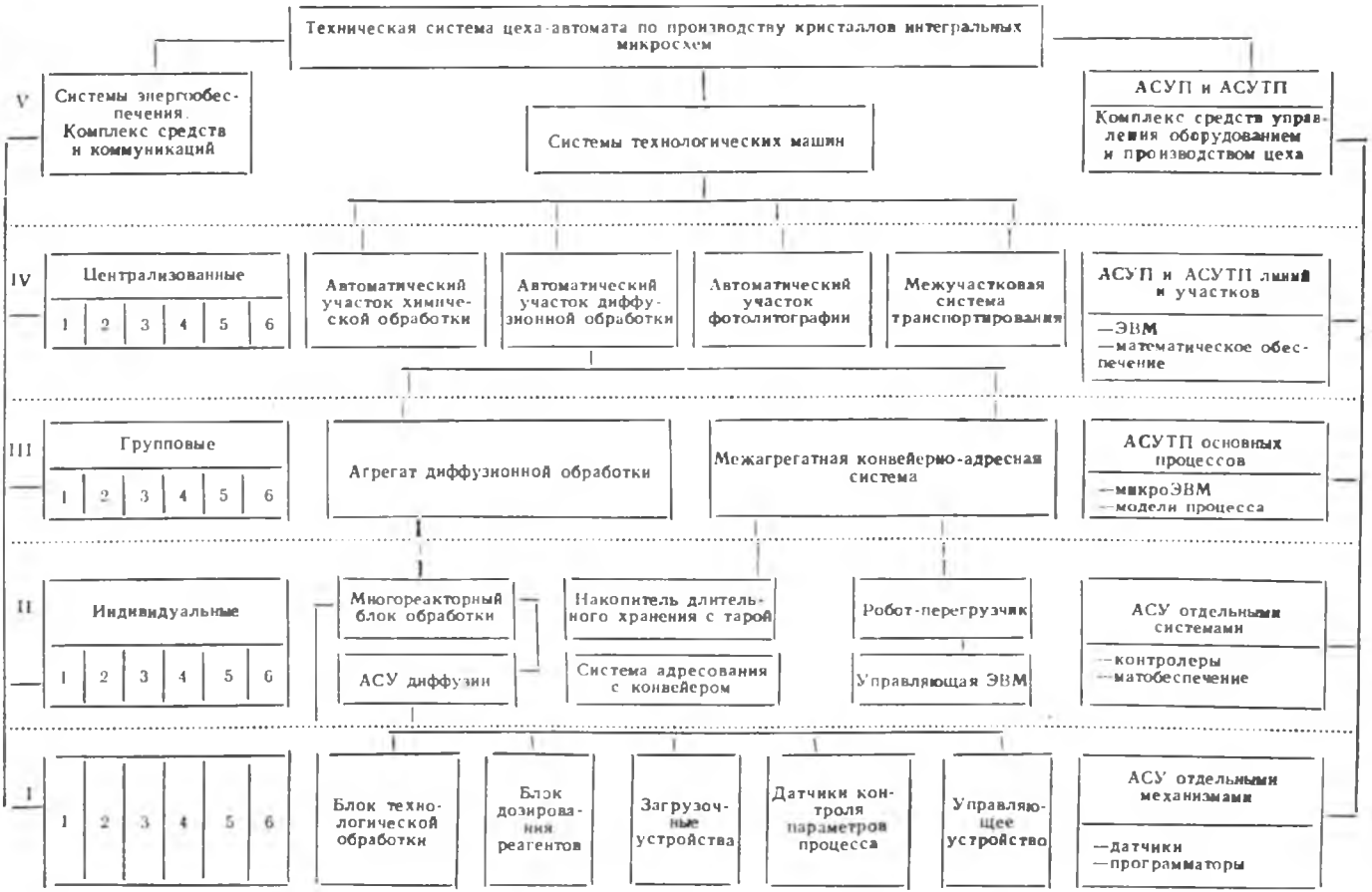


Рис. 5. Место технической системы среди других систем предприятия

дящим в систему, но стоящим на более низком иерархическом уровне машинам. Например, такие требования, как увязка их по производительности, обеспечение энергетикой и технологическими средами, создание системы внутриагрегатных, межагрегатных и межучастковых конвейеров с автоматическим адресованием и, наконец, применение ЭВМ для управления технологическими процессами и производством.

Конструкция и параметры выпускаемых промышленностью полупроводниковых приборов и интегральных микросхем совершенствуют чрезвычайно быстро. А это означает, что даже если количества выпускаемых изделий достаточно велики, то проектировать и изготавливать для их выпуска специальные автоматические машины, а тем более линии, становится экономически невыгодным, они не успевают окупиться. Поэтому подход к созданию и организации массового производства большинства видов изделий приобретает новую форму — организацию массового быстросменного производства. Машины, создаваемые для использования в таких производствах, должны обладать специфическими и противоречивыми свойствами, присущими как машинам, характерным для использования в массовом производстве — высокой производительностью, так и машинам, используемым в серийном производстве — достаточной универсальностью и высокой мобильностью, т. е. быстрой переналаживаемостью на обработку другого изделия. Создание машин-автоматов, автоматических линий и автоматических систем машин обеспечивает высокую производительность, но уменьшает гибкость системы, возможность перенастройки ее с выпуска одного изделия на другое.

Главнейшей задачей современного машиностроения является создание не просто систем оборудования, а гибких технических систем, обеспечивающих их эффективное применение как в мас-


Техническая система цеха-автомата по производству кристаллов интегральных микросхем
Иерархические уровни
V
Системы энергообеспечения. Комплекс средств и коммуникаций
Системы технологических машин
АСУП и АСУТП
Комплекс средств управления оборудованием и производством цеха
IV
Централизованные
1 2 3 4 5 6
Автоматический участок химической обработки
Автоматический участок диффузионной обработки
Автоматический участок фотолитографии
Межучастковая система транспортирования
АСУП и АСУТП линий и участков
—ЭВМ
—математическое обеспечение
III
Групповые
1 2 3 4 5 6
Агрегат диффузионной обработки
Межагрегатная конвейерно-адресная система
АСУТП основных процессов
—микроЭВМ
—модели процесса
II
Индивидуальные
1 2 3 4 5 6
Многореакторный блок обработки
АСУ диффузии
Накопитель длительного хранения с тарой
Система адресования с конвейером
Робот-перегрузчик
Управляющая ЭВМ
АСУ отдельными системами
—контролеры
—матобеспечение
I
1 2 3 4 5 6
Блок технологической обработки
Блок дозирования реагентов
Загрузочные устройства
Датчики контроля параметров процесса
Управляющее устройство
АСУ отдельными механизмами
—датчики
—программаторы

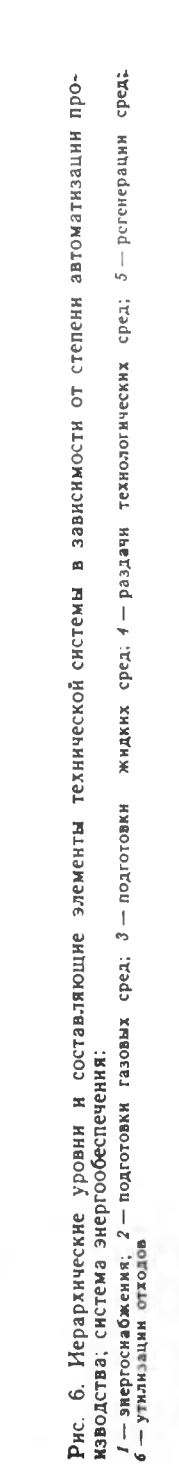


Рис. 6. Иерархические уровни и составляющие элементы технической системы в зависимости от степени автоматизации производства; система энергообеспечения:
1 — энергоснабжения; *2* — подготовки газовых сред; *3* — подготовки жидких сред; *4* — раздачи технологических сред; *5* — регенерации сред; *6* — утилизации отходов

совом быстросменном, так и в серийном производстве. Для этого необходимо создание технических средств, обеспечивающих определенную организационную связь технологических машин друг с другом и реализацию автоматизированного или автоматического управления производством. Такими техническими средствами являются конвейерно-адресные системы для транспортирования изделий, а также роботы, микропроцессоры и ЭВМ для управления машинами, линиями и производством в целом. Разработке этих устройств с учетом специфики их эксплуатации в условиях полупроводникового производства уделяется большое внимание.

Доминирующая в настоящее время тенденция создания гибких систем машин обусловливает необходимость предусматривать техническую возможность объединения отдельных машин в агрегаты на основе интеграции технологических процессов. Этому препятствует различный физико-химический механизм и высокая раздробленность технологических операций, проводимых в разнообразных рабочих средах. Чем выше степень интеграции процессов, тем выше их воспроизводимость как вследствие улучшения условий протекания самого процесса, так и в результате исключения ряда вспомогательных операций, связанных с переносом изделий и полуфабрикатов из одной рабочей камеры в другую.

При поточно-массовой форме организации производства особо важное значение приобретает сохранение чистоты (а в некоторых случаях стерильности) полуфабрикатов и изделий на протяжении всего технологического цикла, поскольку воздействие кислорода, влаги и пыли вызывает ощутимые технологические потери. Поэтому возникает необходимость строго ограничить время межоперационного хранения или пролеживания полуфабрикатов и изделий перед проведением последующих операций. Это создает значительные затруднения в организации процесса оперативного регулирования и управления производством. Решить эти проблемы значительно проще, если система состоит из агрегатированных машин, автоматизированных и автоматических линий и участков, стоящих на III и IV иерархическом уровне и охватывающих группы технологических операций, допускающих после их выполнения регламентированные перерывы в обработке и накопление изделий на границах участков. По этой же причине легче синхронизировать, или выровнять по производительности работу отдельных участков, например, с различной величиной партий одновременно обрабатываемых изделий.

Важным требованием, предъявляемым к машинам, включаемым в систему, является повышение степени их автоматизации. При этом применяют микропроцессоры или мини-ЭВМ для управления протеканием технологического процесса с ограничением фукнций оператора. Желательно полное исключение субъективного влияния оператора на ход технологического процесса. Это становится возможным лишь в том случае, если система полностью оснащена всеми необходимыми датчиками контроля хода как основных, так и вспомогательных операций технологического процесса, непрерывно выдающими информацию на управляющую ЭВМ.

Итак, можно отметить следующие основные тенденции в развитии технологического оборудования в микроэлектронике:

агрегатирование машин на основе интеграции технологических процессов;

высокую степень автоматизации машин за счет применения микропроцессоров, мини-ЭВМ и датчиков оперативной информации хода технологического процесса;

переход от создания отдельных машин к созданию систем машин;

применение конвейерно-адресных устройств и роботов для обеспечения гибкости систем машин, применяемых в массовом быстросменном и серийном производстве;

снижение стоимости, материало- и энергопотребления машин.

ГЛАВА 2

ВИДЫ НАГРЕВА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ

Система нагрева предназначена для нагрева обрабатываемого изделия до заданной температуры.

Устройство для нагрева изделия должно обеспечить:

отсутствие загрязнений обрабатываемых изделий материалом нагревателя и примесями из него;

незначительную инерцию при переходе от одного температурного режима работы к другому;

воспроизводимые и постоянные с заданной точностью значения температур на всей длине технологической зоны и возможность создания надежной системы автоматического регулирования температурного режима;

определенный срок службы нагревателя при простоте обслуживания.

Наиболее распространенными в полупроводниковом производстве видами нагрева являются индукционный и резистивный.

2. ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Индукционный нагрев — прогрессивный способ, обладающий следующими достоинствами: быстротой, равномерностью и высокой стабильностью нагрева. Нагрев токами высокой частоты позволяет осуществлять плавное и точное регулирование температуры.

Индукционный нагрев основан на выделении тепла в результате возникновения вихревых токов и магнитного гистерезиса (у ферромагнитных материалов) в телах, помещенных в переменное магнитное поле. Температура нагрева возрастает с увеличением частоты тока, поэтому для индукционного нагрева применяют частоты, значительно превышающие промышленную (50 Гц) и достигающие десятков мегагерц. Система индукционного нагрева имеет индуктор, подводящие или согласующие цепи и генератор токов высокой частоты. Преобразование электрической энергии в тепловую происходит в самом нагреваемом объекте.

Принципиальная схема индукционного нагрева показана на рис. 7. Индукционная высокочастотная установка представляет собой трансформатор, питаемый от генератора *1* токов высокой частоты. Первичной обмоткой трансформатора является индуктор *2*, подключенный непосредственно к генератору или через пони-

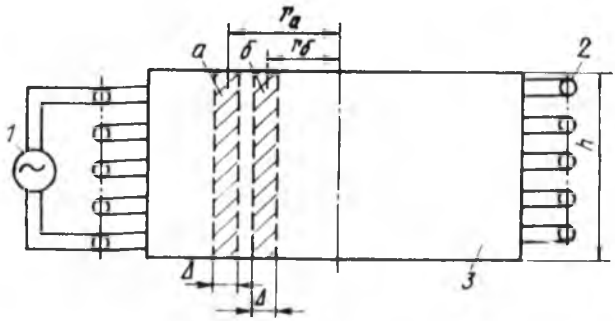


Рис. 7. Принципиальная схема индукционного нагрева

жающий трансформатор. Вторичной обмоткой является нагреваемая деталь *3*, которую можно считать одним короткозамкнутым витком. По первичной обмотке протекает ток высокой частоты, образующий переменное магнитное поле, которое наводит во вторичной обмотке ЭДС, вызывающую вихревые токи значительной плотности, нагревающие детали. Вихревые токи циркулируют в нагреваемой детали в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного потока. Если деталь из ферромагнитного материала, то она еще подвергается перемагничиванию и дополнительному нагреву из-за магнитного гистерезиса. Нагрев детали, вызванный магнитным гистерезисом, длится до тех пор, пока температура детали не достигает температуры, при которой вещество теряет магнитные свойства (точки Кюри). Выделяющееся в теле при возникновении вихревых токов количество тепла пропорционально квадрату тока в данном участке проводника, т. е.

$$Q = I^2 R\tau, \text{ Дж},$$

где R — сопротивление проводника; τ — время нагрева.

Рассмотрим индукционный нагрев тела, имеющего форму цилиндра (рис. 7). Разобьем цилиндр на отдельные слои a и b одинаковой толщины Δ и высоты h. В этих слоях с радиусами r_a и r_b, представляющих короткозамкнутые витки, переменное магнитное поле возбуждает вихревые токи.

Вихревые токи, протекающие в каждом из рассматриваемых слоев, создают собственные магнитные поля, направленные против основного поля первичной обмотки, в результате чего возникает некоторое результирующее магнитное поле. Внутренняя часть детали охвачена большим количеством элементарных вихревых токов по сравнению с периферийной частью, поэтому результирующее собственное магнитное поле будет неравномерным — в центре бо́льшим, а на периферии — меньшим, во внешних слоях образуется сгущение потока магнитной индукции. Неравномерность потока магнитной индукции еще более увеличивает неравномерность результирующей ЭДС по сечению детали, что в итоге приводит к тому, что результирующая ЭДС и плотность

тока убывают от поверхности к центру по экспоненциальному закону:

$$i_x = i_0 \exp(-x/\delta),$$

где i_0 — плотность тока на поверхности, А/м²; i_x — плотность тока на глубине, А/м²; δ — величина, называемая глубиной проникновения тока, м.

На глубине δ плотность тока изменяется в e раз и выделяется 90—95 % всей энергии, передаваемой от индуктора нагреваемому изделию. Нагрев изделия за пределами δ происходит за счет передачи тепла теплопроводностью от поверхностного слоя в глубь изделия. Глубину проникновения тока в нагреваемом изделии и индукторе (δ, м) определяют по уравнению

$$\delta = 5030\,(\rho/(f\mu))^{0.5},$$

где ρ — удельное сопротивление материала нагреваемого изделия (или индуктора) Ом·м; μ — относительная магнитная проницаемость материала нагреваемого изделия или индуктора; f — частота тока, Гц.

Для немагнитных материалов и материалов, имеющих температуру выше точки Кюри, относительная магнитная проницаемость равна единице. Глубина проникновения δ возрастает с увеличением удельного электрического сопротивления ρ (Ом·м) и уменьшается с увеличением частоты f (Гц) и относительной магнитной проницаемости материала μ. При частоте тока более 1 кГц можно получать тонкий нагретый слой, т. е. проводить поверхностную термическую обработку изделия, а используя ток промышленной частоты (50 Гц), — сквозной прогрев изделия.

Форма и размеры индуктора зависят от геометрии нагреваемого изделия. Индуктор изготавливают из медной трубки специального профиля в виде цилиндрической спирали или плоских витков с короткими наклонными переходами между витками. Для охлаждения индуктора по нему пропускают воду. Мощность, потребляемая при индукционном нагреве, складывается из мощности, передаваемой нагреваемому изделию, и мощности, теряемой в индукторе, т. е. $P = P_1 + P_2$.

КПД печи с индукционным нагревом определяется как отношение мощности выделяемой в металле, ко всей потребляемой мощности; т. е.

$$\eta_{эл} = P_2/(P_1 + P_2) = 1/(1 + P_1/P_2).$$

Мощность P_1, теряемая в индукторе,

$$P_1 = R_1 I_1^2.$$

Мощность P_2, выделяемая в нагреваемом изделии,

$$P_2 = R_2 I_2^2 = R_2 n^2 I_1^2,$$

где R_1 и R_2 — активные сопротивления соответственно индуктора и нагреваемого изделия; I_1 и I_2 — токи в индукторе и нагревае-

мом изделии; n — коэффициент трансформации, равный числу витков индуктора ($n=\omega_1$).

Активные сопротивления R_1 и R_2 определяются геометрическими размерами и материалом индуктора и нагреваемого изделия, а также глубиной проникновения тока в материал индуктора δ_1 и нагреваемого изделия δ_2:

$$R_1 = \rho_1 l_1/S_1 = \frac{\rho_1 \pi d_1 n}{\delta_1 h_1/n} = \rho_1 \frac{n_2 \pi d_1}{\delta_1 h_1};$$

$$R_2 = \rho_2 l_2/S_2 = \frac{\rho_2 \pi d_2}{\delta_2 h_2},$$

где d_1, d_2, h_1 и h_2 — диаметры и высоты соответственно индуктора и нагреваемого изделия.

После подстановки значений R_1 и R_2 электрический КПД

$$\eta_{эл} = 1 \Big/ \left(1 + \frac{d_1 h_2 \rho_1 \delta_2}{d_2 h_1 \rho_2 \delta_1}\right) = 1 \Big/ \left(1 + \frac{d_1 h_2}{d_2 h_1} \sqrt{\frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2}}\right).$$

Мощность P_2 выделяется в нагреваемом изделии в виде нагревающего его тепла ($P_н$) и частично излучается в окружающее пространство ($P_п$), т. е. $P_2 = P_н + P_п$. Тепловой КПД печи определяется отношением мощности, идущей на нагрев изделия, ко всей выделяемой в изделии мощности:

$$\eta_{теп} = P_н/(P_н + P_п).$$

Электрический КПД системы индукционного нагрева увеличивается с уменьшением зазора между индуктором и нагреваемым изделием, а также с увеличением отношения удельных сопротивлений нагреваемого изделия и материала индуктора ρ_2/ρ_1. Электрический КПД возрастает также при увеличении отношения диаметра нагреваемого изделия к глубине проникновения тока (d_2/δ_2), достигая максимума при $d_2 > 10\delta_2$.

В технике индукционного нагрева для получения токов определенной частоты используют следующие типы генераторов (табл. 3): электромашинные, ионные, тиристорные, искровые и ламповые.

Таблица 3. **Генераторы, применяемые для индукционного нагрева**

Вид генератора	Диапазон мощностей, кВт	КПД, %	Диапазон частот, Гц
Электромашинный	5—3000	70—80	$2 \cdot 10^1$—10^4
Ионный	100—1000	85—90	$5 \cdot 10^2$—$3 \cdot 10^3$
Тиристорный	1—50	80—95	От сотен герц до десятков килогерц
Искровой	1—50	20—40	$1 \cdot 10^3$—10^6
Ламповый	1—500	50—65	От $5 \cdot 10^4$ Гц до нескольких мегагерц

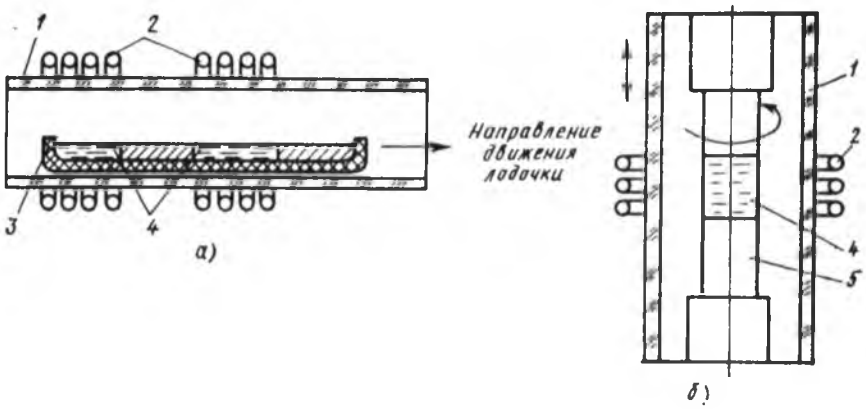


Рис. 8. Индукционный нагрев для зонной плавки материалов:
а — тигельный способ; *б* — бестигельный способ;
1 — кварцевая труба; *2* — индуктор; *3* — лодочка (тигель); *4* — расплавленная зона; *5* — слиток материала

Применение индукционного нагрева для зонной плавки показано на рис. 8. Узкая зона очищаемого материала, расплавленного индукционным нагревом, перемещается вдоль слитка, концентрируя в себе определенные примеси. Индукционный нагрев создает дополнительное перемешивание вихревыми токами в расплавленной зоне слитка, способствуя более эффективной очистке материала. Исходный материал помещается в кварцевую трубу с защитной атмосферой. С внешней стороны трубы расположен многовитковый индуктор.

Расположение индуктора вне кварцевого реактора обеспечивает стерильность процесса, простоту охлаждения камеры, равномерность, высокую скорость и стабильность нагрева, а также возможность создания надежной системы автоматического регулирования температурного режима процесса.

Индукционный нагрев позволяет получить максимальную удельную мощность энергии $5 \cdot 10^7$ Вт/м^2.

3. РЕЗИСТИВНЫЙ НАГРЕВ

Нагрев проводящего тела при прохождении через него электрического тока называют резистивным нагревом.

Согласно закону Джоуля — Ленца

$$Q = UIt = U^2t/R = I^2Rt.$$

Для выделения тепла в твердом проводнике можно использовать постоянный и переменный электрический ток. Применение постоянного тока затруднено и экономически невыгодно из-за отсутствия источников (генераторов) большой силы тока и низкого напряжения, которые необходимы для выделения тепла в твердом проводнике, обладающем высокой электропроводностью.

Способность переменного тока к трансформации позволяет получать требуемые напряжения. При переменном токе под сопротивлением проводника понимают активное сопротивление, которое больше сопротивления проводника постоянному току. Это объясняется наличием скин-эффекта, влияние которого возрастает с увеличением частоты f, диаметра проводника d, магнитной проницаемости μ и падает с ростом электрического сопротивления ρ:

$$\xi = \varphi\left(d, \sqrt{\mu f/\rho}\right),$$

где ξ — коэффициент, характеризующий скин-эффект.

Активное сопротивление проводника

$$R = R_{\text{п}}\xi,$$

где $R_{\text{п}}$ — сопротивление проводника при протекании постоянного тока.

Наличие скин-эффекта приводит к появлению индуктивного сопротивления X, учитывающего действие ЭДС самоиндукции, создаваемой переменным магнитным полем. Полное сопротивление проводника переменному току

$$Z = \sqrt{X^2 + R^2}.$$

Индуктивное сопротивление

$$X = 2\pi f L,$$

где L — коэффициент самоиндукции, Гн.

Напряжение на зажимах проводника

$$U = IZ,$$

где I — величина переменного тока.

При нагреве проводника переменным током вследствие наличия индуктивного сопротивления ток и напряжение не совпадают по фазе и мощность, выделяемая в проводнике,

$$P = UI\cos\varphi.$$

При этом коэффициент мощности

$$\cos\varphi = P/UI = R/Z = R/\sqrt{X^2 + R^2}.$$

Рассмотренный принцип выделения тепла в проводнике при пропускании тока находит применение в печах прямого (контактного) и косвенного нагрева.

В печах сопротивления прямого нагрева ток подводится непосредственно к нагреваемому изделию. При расчете электрических параметров нагрева необходимо учитывать изменение в процессе нагрева сопротивления материала.

В печах сопротивления косвенного нагрева в качестве рабочего тела используют специальные нагреватели, выполненные из высокоомных жаропрочных материалов. При этом передача тепла нагреваемому изделию осуществляется излучением.

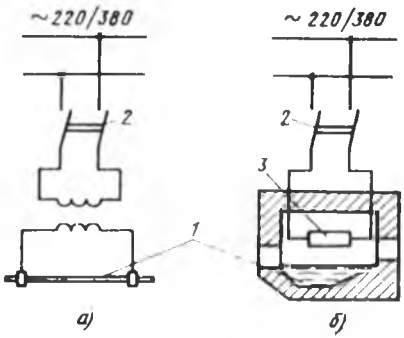


Рис. 9. Схемы электрических печей сопротивления:

а — прямой нагрев; *б* — косвенный нагрев; *1* — нагреваемый материал; *2* — выключатель или магнитный пускатель; *3* — электронагревательный элемент

На рис. 9 показаны схемы печей сопротивления. В печах прямого нагрева достигается наибольшая эффективность резистивного нагрева при значительной скорости и достаточной равномерности нагрева по сечению изделия.

Преимуществами печей сопротивления косвенного нагрева являются простота регулирования температуры и получения требуемого распределения температуры в печи. Материал нагревательного элемента должен обладать: возможно большим удельным электрическим сопротивлением, возможно меньшим температурным коэффициентом сопротивления, высокой жаропрочностью, стойкостью к окислению, легкостью обработки и невысокой стоимостью. Для металлических нагревателей применяют сплавы на основе никеля, хрома, железа и алюминия, отличающиеся большим удельным электрическим сопротивлением при сравнительно малых температурных коэффициентах сопротивления. В печах с температурой 1000—1100° используют нихром (20 % Cr и 80 % Ni), мало подверженный окислению при высоких температурах за счет образования на поверхности тонкой и прочной защитной пленки окиси хрома.

Нагревательные элементы изготавливают из проволоки или ленты. Проволочные нагреватели обычно выполняют из проволоки диаметром $d=2—8$ мм. Средний диаметр спиралей из нихрома $D=(5—8)d$. Шаг намотки h принимают равным $(2—4)d$, так как при малом шаге происходит взаимное экранирование витков. Длину спирали L и число витков n при известной длине проволоки l определяют по формулам

$$L = lh/(\pi D); \qquad n = 10^3 L/h.$$

Нагревательные элементы обычно изготовляют из лент толщиной $a=1—2$ мм и шириной $b=(8—12)a$.

Расчет нагревательных элементов включает выбор типа, количества и материала нагревательных элементов, определение их геометрических размеров и размещение внутри печи. Исходными данными для расчета являются суммарная мощность печи (P), напряжение питания (U), размеры печи и ее рабочая температура.

Расчет необходимой мощности нагревателей проводится на основе данных теплового расчета по уравнению

$$P = Qk,$$

где Q — суммарный расход тепла в печи в единицу времени, Вт; k — коэффициент неучтенных потерь.

Для периодически работающих печей $k=1{,}4 \div 1{,}5$, для печей непрерывного действия $k=1{,}2 \div 1{,}3$. Расчет нагревательных элементов начинают с выбора материала для их изготовления по величине конечной температуры нагреваемого изделия, причем допустимая температура материала должна быть на 50—200 °С больше конечной температуры. Для выбранного материала определяют удельное электрическое сопротивление при рабочей температуре нагревателя по формуле

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha_R t),$$

где ρ_0 — удельное электрическое сопротивление материала при $t=0$ °С, Ом·мм²/м; α_R — усредненный температурный коэффициент сопротивления $К^{-1}$; t — рабочая температура нагревателя, °С.

Геометрические размеры нагревательного элемента должны обеспечивать выделение на нем определенной мощности, с одной стороны, и необходимую теплоотдачу с поверхности, с другой.

Учитывая первое условие, определим электрическое сопротивление нагревателя (Ом):

$$R_t = U_1^2 / P_1.$$

Сопротивление нагревателя связано с его размерами соотношением

$$R_t = \rho_t l / S,$$

где l — длина нагревателя, м; S — площадь поперечного сечения, мм².

Необходимую длину нагревателя находим по формуле

$$l = U_1^2 S / (\rho_t P_1).$$

Количество тепла, передаваемое нагревателем, определим по общему уравнению теплообмена

$$P_1 = \alpha_\Sigma (t_н - t_з) F_1,$$

где F_1 — площадь поверхности нагревателя, м²; α_Σ — суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $t_н$, $t_з$ — температуры соответственно нагревателя и загрузки.

Принимая во внимание второе условие, определим площадь наружной теплоотдающей поверхности нагревателя, обеспечивающую отдачу тепла, выделяемого нагревателем.

Тепловой поток с единицы поверхности нагревателя в единицу времени носит название удельной поверхностной нагрузки, или удельной поверхностной мощности q, Вт/м²:

$$q = P_1 / F_1 = \alpha_\Sigma (t_н - t_з).$$

Цилиндрический графитовый нагреватель диаметром 130 мм, высотой 245 мм с толщиной стенок 10 мм имеет сопротивление $4 \cdot 10^{-3}$ Ом. При пропускании через графитовый нагреватель то-

ков от сотен до тысяч ампер и приложении напряжения в десятки вольт (10—35 В) возможно получение рабочей температуры нагревателя до 3000 °С.

Нагреватель, выполненный из нихромовой проволоки диаметром 2 мм и длиной 21 м, имеет сопротивление несколько Ом. Через нихромовый нагреватель пропускается ток от десятков до сотен ампер. При высоком напряжении, прикладываемом к нагревателю, уменьшается диаметр проволоки и увеличивается ее длина. Целесообразно понижать напряжение до десятков вольт, увеличивая диаметр и уменьшая длину проволоки для изготовления нагревателя.

Нагреватели включают в сеть через понижающие трансформаторы с напряжением на низкой стороне 35—70 В. Питание пониженным напряжением хотя и увеличивает стоимость установки, но позволяет избежать межвитковых замыканий нагревателя и пробоя на корпус и увеличивать диаметр проволоки при уменьшении ее длины.

Графитовые нагреватели рассчитывают только по сопротивлению без учета удельной поверхностной нагрузки, так как могут выдерживать высокие температуры (до 3000 °С).

В качестве примера использования резистивного нагрева в оборудовании для микроэлектроники рассмотрим схему реактора установки для эпитаксии германия, приведенную на рис. 10. В установке имеется два вертикальных реактора с многоярусным графитовым подложкодержателем. Внутри графитового многоярусного подложкодержателя находится разрезной графитовый нагреватель, закрепленный на водоохлаждаемых никелевых токовводах. Нагреватель и подложкодержатель изготовляются из графита марки МПГ-6. Для выравнивания температуры на подложкодержателе применяют систему молибденовых экранов, располагаемых между нагревателем и пьедесталом, что позволяет получать разброс температуры по высоте подложкодержателя в 150 мм±2 К при температуре 900 °С. Контроль температуры осуществляют платино-платинородиевой термопарой, введенной в реактор через верхний фланец. Блок нагрева состоит из графитового нагревателя, токовводов и транс-

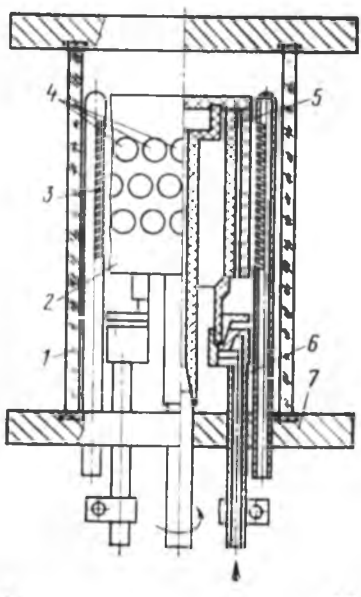


Рис. 10. Резистивный нагрев в реакторе для газовой эпитаксии:

1 — кварцевый реактор; *2* — графитовый подложкодержатель; *3* — коллекторы для подачи и вывода парогазовой смеси; *4* — подложки; *5* — разрезной графитовый нагреватель; *6* — водоохлаждаемые никелевые токовводы; *7* — нижний фланец

1343968
ФБ ГЭИ

форматора, регулируемых подмагничиванием шунтов. Максимальная мощность трансформатора 16 кВт, что позволяет поддерживать температуру в реакторе 1800 °С. Регулировку осуществляют по первичной цепи трансформатора с помощью высокоточного регулятора температуры ВРТ-3.

Система резистивного нагрева имеет следующие достоинства: высокий КПД, низкую стоимость оборудования, безопасна в работе (низкое напряжение на зажимах) и малые габаритные размеры.

К недостаткам использования резистивного нагрева можно отнести возможность загрязнения материалом нагревателя при расположении его внутри реактора и старение нагревателя, требующее его периодической замены.

4. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАГРЕВ

Сущность электронно-лучевого нагрева заключается в том, что кинетическая энергия потока электронов при бомбардировке ими поверхности нагреваемого материала превращается в тепловую, нагревая последний.

На основании закона сохранения энергии кинетическая энергия электрона равна величине работы сил энергетического поля, совершенной при перенесении заряда:

$$W = mv^2/2 = efU,$$

где e — заряд электрона, равный $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ кл; U — ускоряющее напряжение, В; W — кинетическая энергия электрона, Дж; m — масса покоя электрона, равна $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг; v — скорость электрона, м/с, откуда $v = \sqrt{2eU/m} = 5{,}93 \cdot 10^5 \sqrt{U}$ м/с; при $U = 10$ кВ $v = 6 \cdot 10^4$ км/с, а при $U = 40$ кВ $v = 1{,}2 \cdot 10^5$ км/с.

Устройство для получения потока электрона, ускорения их, концентрирования в пучок, направляемый в рабочее пространство, где электрическое поле отсутствует, называют электронной пушкой. Схема электронной пушки показана на рис. 11.

Электронная пушка представляет собой трехэлектронную систему, состоящую из вольфрамового катода *1*, кольцевого анода *4* и управляющего электрода *2*. Электроны, эммитируемые с нагреваемого катода, формируются в луч *3*, который ускоряется за счет разности потенциалов между катодом и анодом (10—50 кВ). Регулирование потока электронов (электронного луча) производится управляющим электродом изменением отрицательного потенциала по отношению к като-

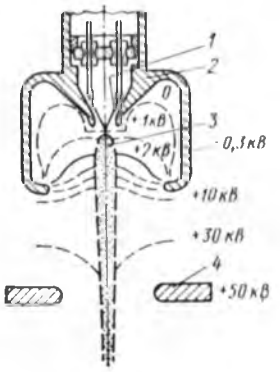


Рис. 11. Схема расположения электродов электронной пушки

ду. В объеме, где размещается электронная пушка, создается вакуум 10^{-3}—10^{-5} Па. Эмиссия электронов с катода ограничивается объемным зарядом электронов.

Для управления электронным лучом, выходящим из электронной пушки, используют фокусирующую и отклоняющую системы, с помощью которых соответственно изменяют сечение потока (пучка) электронов и направляют его под заданным углом на обрабатываемое изделие.

Можно отметить следующие положительные свойства электронно-лучевого нагрева: высокую удельную мощность, безынерционность, отсутствие загрязнения обрабатываемого изделия.

Параметры электронного луча. К ним относятся ток электронного луча i_e, ускоряющее напряжение $U_у$, удельная мощность q и мощность электронного луча W_e.

Мощность электронного луча

$$W_e = i_e U_у.$$

Если электронный луч фокусируется в пятно с диаметром d, то его удельная мощность

$$q = 4 i_e U_у/(\pi d^2).$$

Удельная мощность является одним из главных параметров электронного пучка и может составлять от 10^7 до 10^{12} Вт/м². При испарении вещества электронным пучком в непрерывном режиме используется удельная мощность около 10^7—10^9 Вт/м². Распределение плотности тока в сечении электронного луча подчиняется закону Гаусса:

$$j_e = j_{max}\ e^{-r_л^2/r_н^2},$$

где $r_л$ — текущий радиус электронного луча; $r_н$ — нормальный радиус электронного луча (соответствующий плотности тока j_{max}/e, здесь $e=2{,}71$; j_{max} — максимальная плотность тока электронного луча).

Максимальная плотность анодного тока

$$j_{max} = \frac{4\varepsilon_0}{9}\sqrt{2e/m_e}\,\frac{U^{3/2}}{l^2},$$

где m_e —масса электрона; ε_0 — диэлектрическая проницаемость; l — расстояние между электродами.

Ток в электронном пучке I зависит от ускоряющего напряжения U: $I=PU^{3/2}$, где P — полная проводимость системы катод — анод, которая зависит от формы электродов, геометрии пушки. Эта величина носит название первианса. Для пушки с кольцевым катодом первианс обычно равен 10^{-5} А/В$^{3/2}$.

Для получения заданного отклонения и фокусировки электронного луча изменяют геометрию полюсных наконечников магнита и подбирают необходимое соотношение между напряженностью магнитного поля и ускоряющим напряжением электронной пуш-

ки. Если напряженность магнитного поля в некоторой точке известна, то радиус электронов

$$r_e = \sqrt{\frac{2m_e}{e}}\,\frac{\sqrt{U}}{B},$$

где B — магнитная индукция.

Удельные мощности свыше 10^9 Вт/м^2 используют главным образом при импульсном режиме работы или со сканированием пучка электронов по нагреваемой поверхности материала.

Для выбора параметров электронного луча необходимо оценить тепловой баланс и глубину проникания электронов вглубь обрабатываемого изделия. Уравнение теплового баланса электронного луча можно записать в виде

$$W_e = W_{\text{тм}} + W_{\text{пл}} + W_{\text{исп}} + W_{\text{вэ}} + W_{\text{р}},$$

где W_e — энергия, подводимая электронным лучом к испаряемому материалу; $W_{\text{тм}}$ — потери энергии за счет теплопроводности материала; $W_{\text{пл}}$ — расход энергии на плавление материала; $W_{\text{исп}}$ — расход энергии на испарение материала; $W_{\text{вэ}}$ — энергия, уносимая вторичными электронами; $W_{\text{р}}$ — энергия на рентгеновское излучение.

При удельной мощности энергии электронного луча $W_1 \approx \approx (10^7—10^9)$ Вт/м^2; $W_{\text{исп}} \leqslant (2—10)$ %; $W_{\text{пл}} \leqslant (30—35)$ %; остальная мощность расходуется за счет теплопроводности и уноса энергии электронами, эммитируемыми из зоны нагрева. Величину ускоряющего напряжения выбирают, исходя из значений удельной мощности q и мощности электронного луча W.

Соударения электронов со связанными электронами обрабатываемого металла могут привести к их переходу на более удаленную орбиту с последующим возвращением на прежнее место и излучением при этом кванта электромагнитной энергии, частота которой лежит в области рентгеновского излучения.

Электроны пучка при прохождении в твердом теле могут сталкиваться со свободными электронами вещества. При этом электронам сообщается энергия, часто достаточная для выхода в вакуум. Происходит вторичная эмиссия электронов, на что затрачивается часть энергии электронов.

При взаимодействии пучка электронов с обрабатываемым изделием у его поверхности может образоваться слой с повышенным давлением паров материала. Электроны, проходя через этот слой, соударяются с молекулами пара и ионизируют их, затрачивая часть энергии.

Расчеты показывают, что потери, обусловленные лучеиспусканием, рентгеновским излучением, вторичными электронами и термоэлектронами, составляют менее 3 %, а основная доля теряемой энергии уносится отраженными электронами, количество которых определяется коэффициентом отражения γ, зависящим от атомного номера элемента z.

Для инженерных расчетов можно использовать выражение

$$\gamma = m/(xz^{1/3}),$$

где m — масса атома, г; x — константа, для легких элементов ($z=6\div7$) $x=106\cdot10^{-23}$ г; для тяжелых элементов ($z=74\div92$) $x=15{,}5\cdot10^{-23}$ г.

Используя значение γ, можно представить $W_{вэ}$ в виде

$$W_{вэ} = W_0 k\gamma,$$

где k — коэффициент пропорциональности, характеризующий распределение отраженных электронов по их энергии ($k=0{,}45$—$0{,}50$).

Экспериментальные измерения коэффициента отражения γ показали, что последний слабо зависит от энергии электронов (в диапазоне 50—30 кэВ). Однако он быстро возрастает по мере роста z с $\gamma=0{,}06$ (для углерода) до $\gamma=0{,}42$ (для серебра).

При бомбардировке поверхности часть электронов проникает внутрь вещества, вступая с ним во взаимодействие. В результате происходит их торможение на глубине нескольких микрометров. Глубину проникновения электронов можно рассчитать по формуле

$$\delta = a\frac{A}{z\rho}U^2 \approx 2{,}35\cdot10^{-6}\frac{U^2}{\rho},$$

где a — постоянная величина; A — атомная масса; z — атомный номер; ρ — плотность, г/см^3, U — напряжение, кВ.

При величине ускоряющего напряжения 100 кВ глубины проникновения электронов в алюминий и вольфрам соответственно составляют 87 и 12 мкм.

Расчеты показывают, что температура поверхности нагреваемого вещества уменьшается с увеличением энергии электронов вследствие большого выделения тепла в глубине тела.

В табл. 4 приведены значения температур центральной зоны поверхности некоторых металлов, нагреваемых электронным лучом с различной энергией электронов при $q=10^{10}$ Вт/м^2.

Таблица 4. **Изменение температуры поверхности некоторых материалов в зависимости от энергии электронов**

Материал	Плотность ρ ($\times10^{-3}$), кг/м^3	Температура кипения, К	Температура поверхности (К) при энергии электронов, кэВ		
			20	50	100
Кремний	2,3	2693	6293	4993	2413
Алюминий	2,7	2613	4443	3993	2793
Медь	8,9	2653	6043	5943	5693
Вольфрам	19,2	5593	15893	15893	15493

Уменьшение температуры с увеличением энергии электронов связано с увеличением глубины проникновения электронов, при этом максимум температуры находится в глубине тела.

В тяжелых металлах, например в вольфраме, изменение температуры минимально вследствие относительно меньшего пробега электронов. Абсолютное значение температуры определяется теплофизическими свойствами материалов. Итак, можно сделать вывод, что при постоянной удельной энергии электронного луча скорость испарения уменьшается с увеличением энергии электронного луча.

Электронно-лучевой испаритель позволяет испарять с высокой скоростью металлы, сплавы, полупроводники и диэлектрики. В электронно-лучевых испарителях, используемых для осаждения пленок, электроны ускоряются в электрическом поле до энергии 5—30 кэВ и фокусируются на поверхности нагреваемого материала или разогревают тигель с помещенным в нем материалом.

На рис. 12 показаны схемы электронно-лучевых испарителей с косвенным разогревом материала и с разогревом материала рассеянным потоком электронов. При этом используют тигли из керамических материалов: нитрида бора BN, окиси алюминия Al_2O_3, двуокиси кремния SiO_2 или медные водоохлаждаемые тигли. Испарение из охлаждаемого медного тигля обеспечивает высокую чистоту осаждаемых пленок, но этот способ неэкономичен.

Для оценки эффективности работы электронно-лучевого испарителя используют два критерия: скорость испарения материала из тигля (г/мин) и скорость осаждения пленки на подложку (мкм/мин).

Первый критерий наиболее объективно характеризует электронно-лучевой испаритель; второй же зависит от давления в системе, расстояния испаритель — подложка, углового распределения потока пара и т. д. Поэтому данные об электронно-лучевых испарителях содержат как скорости испарения материала, так и скорости осаждения материала на неподвижную подложку при расстоянии 250 мм по нормали от испарителя.

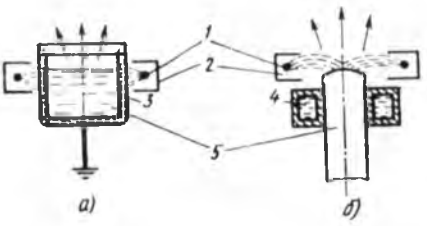


Рис. 12. Схемы электронно-лучевых испарителей:

а — косвенный нагрев материала; *б* — нагрев материала (слитка) потоком электронов; *1* — кольцевой катод; *2* — управляющий электрод; *3* — тигель; *4* — водоохлаждаемый держатель; *5* — испаряемый материал

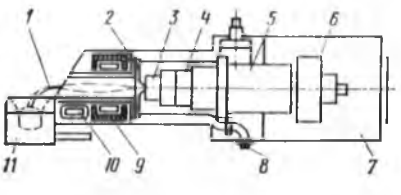


Рис. 13. Электронно-лучевой испаритель с электронной пушкой Пирса

Схема электронно-лучевого испарителя с электронной пушкой Пирса для напыления пленок в вакууме показана на рис. 13. Электроны, эммитируемые катодом *4*, смонтированным на изоляторе *5*, вытягиваются ускоряющим полем через отверстие в аноде *2*. Электронный луч *1* фокусируется электромагнитной линзой *9* и фокусирующим электродом *3* и отклоняется магнитным полем катушки *10* в тигель *11*. Так как рассеиваемая на катоде мощность может составлять сотни ватт, то для охлаждения катодной ножки применяют радиатор *6*, помещенный в защитный кожух *7*, через который вентилятором продувается воздух. Анод может охлаждаться водой, подаваемой через ввод *8*. В электронно-лучевых испарителях с пушкой Пирса, применяемых в микроэлектронике, используют ускоряющие напряжения до 30 кВ.

Основными характеристиками электронной пушки Пирса являются удельная мощность, мощность, подводимая электронным лучом к испаряемому материалу W_e, ускоряющее напряжение U_y и ток электронного пучка i_e. Обычно для получения удельной мощности увеличивают ускоряющее напряжение. При этом возрастают требования к изоляции катода и фокусирующего электрода.

Системы отклонения луча электронов показаны на рис. 14. При электромагнитной системе отклонения (рис. 14, *а*) луч электронов *1* поворачивается на 90° и фокусируется в центре тигля *3*. Испаряемый материал осаждается на поверхность конденсации *2*. Диаметр пучка можно изменить, увеличивая или уменьшая ток фокусирующей линзы. Например, пучок мощностью 25 кВт может иметь диаметр от 10 до 60 мм, при этом удельная мощность изменяется примерно от $3 \cdot 10^8$ до $1 \cdot 10^7$ Вт/м^2.

Сканирование пучка осуществляется с помощью электромагнитной системы (рис. 14, *а*) или постоянного магнита *1* (рис. 14, *б*). Электронно-лучевой испаритель с пушкой Пирса имеет следующие положительные свойства:

стабильный режим испарения при высоких мощностях пучка, обусловленный большим расстоянием между катодом и тиглем;

возможность поддержания низкого давления в рабочей камере за счет специальной вакуумной системы для откачки электронной пушки.

Использование техники электронно-лучевого испарения для изготовления тонкопленочных элементов схем является одним из

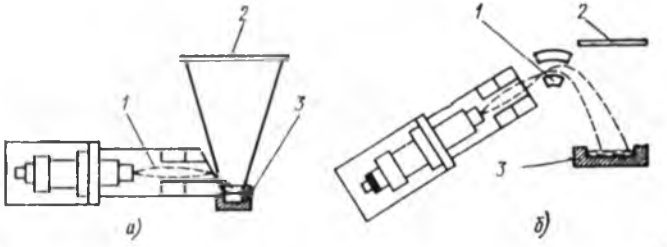


Рис. 14. Системы отклонения луча электронов:
а — электромагнитная; *б* — магнитная

перспективных направлений в повышении качества изделий. Улучшение параметров наносимых пленок достигается за счет высоких скоростей испарения, отсутствия взаимодействия испаряемого материала с материалом тигля, а также за счет полной автоматизации процесса осаждения пленок при строгом соблюдении всех технологических режимов. Усилия разработчиков таких систем как у нас в стране, так и за рубежом направлены на создание эффективных систем электронно-лучевого испарения с выводом сигналов на ЭВМ.

5. ЛУЧИСТЫЙ НАГРЕВ

Нагрев обрабатываемого тела потоком лучистой энергии от высокоинтенсивного источника излучения с определенными спектральными характеристиками называют лучистым нагревом. Поток лучистой энергии в зависимости от температуры и физических свойств излучателя представляет собой электромагнитные волны ультрафиолетового, оптического и инфракрасного спектров.

Принципиальная схема термической установки с лучистым нагревом показана на рис. 15. Основными конструктивными элементами установок с использованием лучистого нагрева являются: нагреватель-излучатель *2*, рефлектор *3*, отражающий и фокусирующий излучение, кварцевый реактор *1* для размещения обрабатываемых изделий; вспомогательные устройства для крепления или перемещения изделия, охлаждения рефлектора, излучателя, реактора и т. д.

В зависимости от того, в каком диапазоне длин волн излучается максимум энергии, источники излучения бывают для ультрафиолетового, оптического и инфракрасного нагрева. Требования к источникам излучения:

малые размеры;

широкий диапазон излучения энергии;

отсутствие загрязнения обрабатываемого изделия;

малая инерционность и возможность гибкого автоматического управления процессом;

удобство обслуживания;

возможность ведения процесса в различных средах.

Применяемые для нагрева источники излучения могут быть подразделены на резистивные и газоразрядные (табл. 5).

В устройствах, использующих инфракрасный (ИК) нагрев, широко применяют резистивные излучатели. Наиболее полно от-

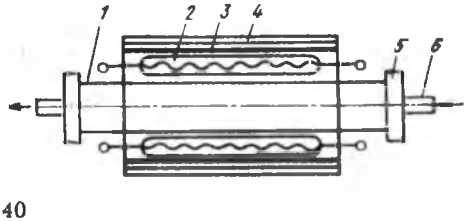


Рис. 15. Принципиальная схема термической установки с лучистым нагревом:

1 — кварцевый реактор; *2* — источник излучения; *3* — рефлектор; *4* — кожух печи; *5* — фланцы реактора; *6* — патрубки для создания технологической среды

Таблица 5. **Технические характеристики различных источников излучения**

Наименование технической характеристики	Резистивные излучатели				Газоразрядные излучатели	
	спираль из сплава ОХ27Ю5А	силитовый стержень	стержень из дисилицида молибдена	лампы галогенные	дуговые лампы высокой интенсивности	ксеноновые лампы
Температура рабочего тела нагревателя °С	До 1300	1400	1250—1650	2200—3000	6000	6000
Длина волны максимума излучения, мкм	1,83	1,72	1,54	1,1	0,6	—
Диапазон λ_1—λ_2 излучения 90% энергии, мкм	1,2—8	1,1—8,5	1—6,5	0,75—5	0,3—2,1	Селективный характер излучения
Тепловой баланс источника, %:						
Излучение	80—90	80—90	80—90	86	35	40—60
Конвекция и теплопроводность	20—10	20—10	20—10	14	37	30—20
Тепловые потери, %	—	—	—	—	28	30—20
Мощность, кВ·А	0,5	0,5—10	0,5—10	0,05—20	до 20—15	0,8—20
Стабильность лучистого потока	Высокая	Низкая	Высокая	Высокая	Низкая	Низкая
Срок службы, ч	2000—7000	1500—2000	1500—2000	1500—2000	От десятков минут до десятков часов	300—2000
Особенности эксплуатации	Чувствительна к наличию примесей щелочных металлов	Значительная зависимость сопротивления от температуры и срока наработки, образуется налет на рефлекторе	Большие пусковые токи, хрупкость, рабочее положение — вертикальное	Рабочее положение — горизонтальное, ограничена температура колбы и выводов, необходимость светозащиты	Необходимость светозащиты и вентиляции (удаление озона)	Необходимость светозащиты и вентиляции, взрывоопасность при использовании пускового устройства

вечает предъявляемым к источникам излучения требованиям галогенная лампа ИК-нагрева. При эксплуатации галогенной лампы следует учесть, что температура цоколей лампы не должна превышать 350 °С из-за возможности разрушения вследствие различия коэффициентов термического расширения кварца и металла, используемого для нити накала. Спектральный состав излучаемой энергии практически ограничивается диапазоном длин волн 0,8—3,5 мкм, что определяется относительно низкой долей излучения кварца.

Относительная доля энергии, поглощаемой колбой лампы, падает с увеличением температуры спирали и возрастает с увеличением температуры колбы, поэтому при работе ламп в высокотемпературных печах ИК-нагрев плотности потоков излучения спирали и колбы соизмеримы, что приводит к расширению спектрального диапазона излучаемой энергии до 0,7—0,9 мкм. Для обеспечения оптимальных условий работы ламп в этом случае следует устанавливать нагрузку близкую к номинальной, при условии эффективного конвективного охлаждения колбы.

Различные конструкции рефлекторов инфракрасных нагревательных печей с галогенными лампами показаны на рис. 16. Газоразрядные излучатели характеризуются тем, что излучение возникает при прохождении электрического тока через пары или газы. Существует целый ряд ламп дугового, тлеющего, ВЧ и импульсного разряда с различными рабочими средами (воздух, пары ртути, водород, дейтерий, ксенон и др.), в которых происходит разряд. В микроэлектронике применяют дуговые, ксеноновые и ртутные лампы сверхвысокого давления (СВД).

Существенным недостатком газоразрядных излучателей является сложность источника питания, так как хотя дуговой разряд обычно протекает при низком напряжении и значительном токе, но для его зажигания необходимо высокое напряжение. После возникновения дугового разряда ток устанавливается, газ ионизируется и напряжение падает.

Дуговой разряд нестабилен по своей геометрии и мощности, что затрудняет использование газоразрядных ламп для прецизионного нагрева. Газоразрядные лампы создают повышенную опасность в эксплуатации из-за интенсивной ультрафиолетовой и видимой радиации, взрывоопасности и значительного образования озона. Для снижения температуры кварцевой колбы некото-

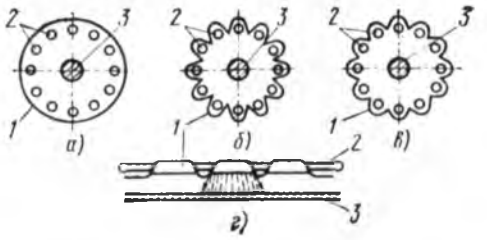


Рис. 16. Различные конструкции рефлекторов инфракрасных нагревательных печей:
а — цилиндрический; *б* — параболический; *в* — эллипсоидальный; *г* — плоский (*1* — рефлектор; *2* — галогенная лампа; *3* — нагреваемое изделие)

рых газоразрядных ламп применяют автономную систему охлаждения дистиллированной водой.

Газоразрядные излучатели используют в устройствах, где необходимо выделить максимум лучистой энергии в ультрафиолетовом или оптическом диапазонах спектра (в устройствах для ультрафиолетовой активации и экспонирования, в оптических печах и др.).

Из рассмотрения технических характеристик различных источников излучения можно заключить, что для ультрафиолетового нагрева ($\lambda < 0{,}4$ мкм) можно использовать ртутные и водородные лампы; для оптического нагрева ($\lambda = 0{,}3 \div 0{,}8$ мкм) — дуговые источники, ксеноновые лампы; для инфракрасного нагрева в ближней области спектра ($\lambda = 0{,}7 \div 3{,}5$ мкм) — галогенные лампы, а в средней области спектра ($\lambda > 3{,}5$ мкм) — проволочные нагреватели из нихрома и других сплавов.

Ультрафиолетовый нагрев используют в полупроводниковом производстве для процессов сушки, пиролитических процессов, окисления; оптический нагрев — для высокотемпературного локального нагрева; инфракрасный нагрев — для прецизионной термообработки изделий в диапазоне температур 100—1200 °С.

КПД установки с лучистым нагревом определяется конструкцией рефлектора, спектральными и энергетическими параметрами источника, формой и спектральной характеристикой нагреваемого тела, прозрачностью защитной оболочки ламп и кварцевого реактора, наличием охлаждения источников излучения. При лучистом нагреве нагревается непосредственно обрабатываемое изделие. КПД установок с лучистым нагревом 70 % и выше. Лучистый нагрев обеспечивает точность поддержания температуры $\pm 0{,}1$ % и плотность лучистой энергии $2{,}2 \cdot 10^6$ Вт/м^2.

6. ПЛАЗМА И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ И ИОННО-ЛУЧЕВЫХ ИСТОЧНИКАХ

Плазма — это газообразное вещество, полностью или частично ионизированное под воздействием температуры, электрического разряда, фотоионизации или гамма-излучения. Однако не всякий ионизированный газ можно назвать плазмой. Необходимым условием существования плазмы является ее квазинейтральность, т. е. она не должна содержать заметного избытка зарядов одного знака. В единице объема плазмы содержится примерно равное количество свободных положительных и отрицательных зарядов. Таким образом, носителями зарядов являются электроны и положительные ионы, но наряду с ними в плазме может содержаться некоторое количество неионизованных атомов или молекул.

В плазме физические процессы обычно идут таким образом, это энергия от внешних источников передается электронам и при соударении электронов с ионами частично переходит к ионам. Электроны обладают более высокими энергиями, чем ионы, энер-

гия ионов превышает энергии нейтральных атомов и молекул, поэтому в плазме различают три температуры: электронную T_e, ионную T_i и атомную T_a. При этом обычно $T_e \geqslant T_i > T_a$.

Большое различие между T_e и T_i, характерное для большинства форм газового разряда, обусловлено большой разницей в величине масс электронов и ионов. Внешние источники электрической энергии, при помощи которых создается и поддерживается газовый разряд, передают энергию непосредственно электронам плазмы. Ионы получают энергию в результате столкновений с быстро движущимися электронами.

В любой установившейся плазме непрерывно протекают два процесса: образование заряженных частиц при ионизации и исчезновение их из области плазмы благодаря рекомбинации (процессу взаимодействия иона с электроном с образованием при этом нейтрального атома и выделением энергии) и диффузия (движение заряженных частиц из области высокой концентрации в область низкой концентрации).

Основные свойства плазмы — яркое свечение, высокая температура, хорошая электрическая проводимость. Кроме того, на нее могут влиять электрические и магнитные силы. В плазме каждая отдельная частица все время находится в поле, создаваемом остальными электронами и ионами. Это поле непрерывно изменяется по величине и направлению.

Для характеристики взаимодействия электронов с ионами вводится величина τ_{ei} — средний промежуток времени между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами. Аналогично можно ввести понятие о среднем промежутке времени между двумя электрон-электронными соударениями τ_{ee}.

В не полностью ионизированной плазме для описания столкновений электронов с нейтральными атомами вводится величина τ_{e0}. Величину τ_e, учитывающую все виды взаимодействия, т. е. истинную величину среднего интервала времени, необходимого для того, чтобы электрон, движущийся в плазме, потерял первоначальное направление скорости, можно рассчитать по формуле

$$1/\tau_e = 1/\tau_{ei} + 1/\tau_{ee} + 1_{c0}.$$

Величина ν_e, обратная τ_e, определяет полное число условных столкновений, испытываемых электроном за 1 с.

Средней длиной свободного пробега электрона λ_e называют то расстояние, на котором происходит потеря первоначального направления скорости электрона:

$$\lambda_e = \bar{v}_e \tau_e,$$

где $\bar{v}$ — средняя скорость теплового движения электронов.

Для замены суммарного эффекта множества небольших отклонений одним условным столкновением, в котором мы видим аналог удара двух шаров, вводятся величины эффективных столкновений электронов с ионами σ_{ei}, электронов с электронами σ_{ee} и ионов с ионами σ_{ii}.

Для приближенной оценки величины σ_{ei} применительно к электронам плазмы используют выражение

$$\sigma_{ei} \approx 4 \cdot 10^{-5} z_i^2 / T_e^2.$$

Выражение для σ_{ee} имеет аналогичный вид:

$$\sigma_{ee} \approx 6 \cdot 10^{-5} / T_e^2.$$

Параметры, характеризующие электрон-ионные взаимодействия, можно рассчитать по формулам

$$\lambda_{ei} \approx \frac{2{,}5 \cdot 10^4 T_e^2}{z_i^2 n_i};$$

$$\tau_{ei} \approx \frac{4 \cdot 10^{-2} T_e^{3/2}}{z_i^2 n_i};$$

$$\nu_{ei} \approx 25 \frac{n_i z_i^2}{T_e^{3/2}}.$$

Рассмотрим значения этих параметров для водородной плазмы высокой концентрации ($n_i = 10^{14}$ 1/см^3; и $z = 1$) для двух значений температур.

При $T_e = 10^4$, что соответствует средней энергии электронов около 1,5 эВ,

$\sigma_{ei} \approx 4 \cdot 10^{-13}$ см^2; $\lambda_{ei} \approx 0{,}03$ см; $\tau_{ei} \approx 4 \cdot 10^{-10}$ с; $\nu_{ei} \approx 2{,}5 \cdot 10^9$ с$^{-1}$.

Из рассмотренного примера видно, что в низкотемпературной плазме электрон на каждом сантиметре своего пути испытывает десятки столкновений.

Энергия ионизации $e\varphi_i$, необходимая для создания положительных ионов, передается нейтральным атомам или молекулам через неупругие взаимодействия с быстрыми ионизирующими частицами. Условие ионизации можно записать в виде

$$W_{max} = m_2 W_1 / (m_1 + m_2) = e\varphi_i,$$

где W_{max} — максимальная переданная энергия; W_1 и m_1 — энергия и масса ионизирующей частицы; m_2 — масса атома или молекулы; φ_i — потенциал ионизации; e — элементарный заряд.

Расчет показывает, что быстрый электрон с энергией W_1, движущийся в плазме с концентрацией ионов n_i, передает ионам в единицу времени энергию, которая определяется выражением

$$Q \approx 1{,}3 \cdot 10^{-25} \frac{n_i z^3}{A \sqrt{W_1}},$$

где z — кратность заряда ионов; A — атомная масса иона.

Подставив в эту формулу вместо W_1 среднюю тепловую энергию электронов, можно оценить поток тепловой энергии от электронов к ионам. Например, в водородной плазме при $n =$

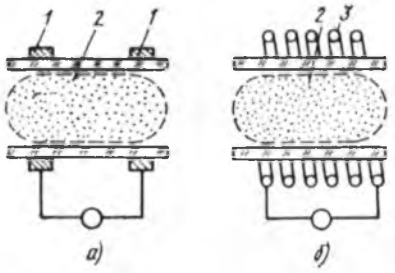


Рис. 17. Схемы возбуждения ВЧ-разряда:
а — с внешними электродами; *б* — Н-разряда; *1* — электроды; *2* — плазма, *3* — катушка

$=10^{13}$ см$^{-3}$ $T_e=10^5$ К и $T_i=0$. Количество энергии, которое электроны плазмы передают ионам за 1 ч в 1 см^3, будет равно 0,4 Дж.

В ионно-плазменных процессах используют ионы газоразрядной плазмы тлеющего, дугового, ВЧ- и СВЧ-разрядов. Рассмотрим образование плазмы в высокочастотном разряде низкого давления. Различные способы возбуждения ВЧ-разрядов показаны на рис. 17. В ВЧ-разрядах процессы на электродах играют второстепенную роль. Возбуждение Е-разряда происходит с помощью высокочастотного электрического поля. Электроды могут находиться либо внутри, либо вне разрядной камеры. Возбуждение Н-разряда происходит индуктивно с помощью индуцированного электрического поля. При сильном взаимодействии между электронами и частицами газа электроны могут принимать в первом полупериоде большую энергию, чем отдавать во втором полупериоде благодаря сдвигу фаз их движения относительно электрического поля. При приобретении достаточной энергии начинается процесс ионизации электронным ударом. Прирост энергии электрона плазмы в одном полупериоде описывается уравнением

$$\Delta W_e = \frac{eE_{rf}}{\pi\nu_{rf}}\left(\frac{eE_{rf}}{2\pi\nu_{rf}m_e} + v_{e0}\right),$$

где ν_{rf} — частота ВЧ-поля; v_{e0} — начальная скорость электрона; E_{rf} — напряженность возбуждающего ВЧ-поля.

Мощность, выделяемая в единице объема, при усреднении за период колебаний

$$P = \frac{e^2 n_e}{m_e \nu_s}\,\frac{1}{2}\,E_{rf}^2\,\frac{\nu_s^2}{\nu_s^2+\omega_E^2},$$

где ν_s — частота столкновений электрона с частицами рабочего газа; ω_E — круговая частота возбуждающего ВЧ-поля.

Из этого уравнения следует, что при $\nu_s=\omega_E$ происходит передача мощности и, кроме того, необходимая для зажигания разряда напряженность электрического поля имеет минимальное значение. Это значит, что для достижения оптимальных условий ионизации необходимо подбирать оптимальное соотношение значений давления рабочего газа и частоты электрического поля.

Индуцированную напряженность электрического поля H-разряда при отсутствии внутри катушки электрического проводника определяют согласно формуле

$$E_{rf} = \pi\mu I_{rf} \frac{n_c}{l_c} \nu_{rf} r_c,$$

где μ — магнитная проницаемость; I_{rf} — амплитуда тока через катушку; n_c и l_c — число витков и длина катушки; r_c — расстояние от оси катушки.

Вводимую в плазму энергию и равновесную концентрацию носителей заряда можно увеличивать с помощью дополнительных постоянных электрических и магнитных полей.

Достоинства ионно-плазменных процессов — возможность обработки большой площади с достаточно высокой равномерностью и высокая плотность ионного тока при малых энергиях ионов; недостатки — высокое давление в области мишени (~10 Па), приводящее к обратной диффузии распыляемых частиц, и воздействие плазмы на мишень.

В ионно-лучевых процессах используют ионный пучок, полученный формированием ионов в газовом разряде фокусировкой в системах ионной оптики. Схемы ионных источников с высокочастотным разрядом показаны на рис. 18.

В ионных источниках с ВЧ-разрядом используют H- и E-разряды с внешними электродами. Вследствие относительно высокого рабочего давления в источнике (1—10 Па) в качестве экстракционной системы применяют преимущественно отрицательный управляющий электрод 7, в котором выполнены отверстия (каналы). Частоту ВЧ-поля выбирают от единиц до сотен мегагерц. Обычно используют индуктивный разряд с дополнительным резонансным продольным (рис. 18, *а*) или поперечным (рис. 18, *б*) магнитным полем. Стенки разрядной камеры *3* изготавливают из изолирующего материала (стекла, керамики). Поэтому они заряжаются отрицательно и играют роль полого катода. Ионные источники с ВЧ-разрядом можно использовать для одновременного получения нескольких мощных ионных пучков с помощью электрода, имеющего большое число каналов. Для получения максимального ионного тока существует оптимальное отношение радиуса и длины разрядной камеры. При радиусах 40 и 100 мм и частотах возбуждающего поля 8,2 и 8,3 МГц оптимальное отношение равно восьми.

Положительная особенность ионных источников с ВЧ-разрядом состоит в том, что они работают без накального катода. При этом, если электроды покрывают слоем химически инертного материала, то их можно использовать для формирования ионных пучков химически активных элементов и соединений, например кислорода, бора и т. д.

Достоинства ионно-лучевых процессов — возможность изменения угла бомбардировки, независимое регулирование в широких пределах плотности тока ионного пучка и энергии ионов, низкое

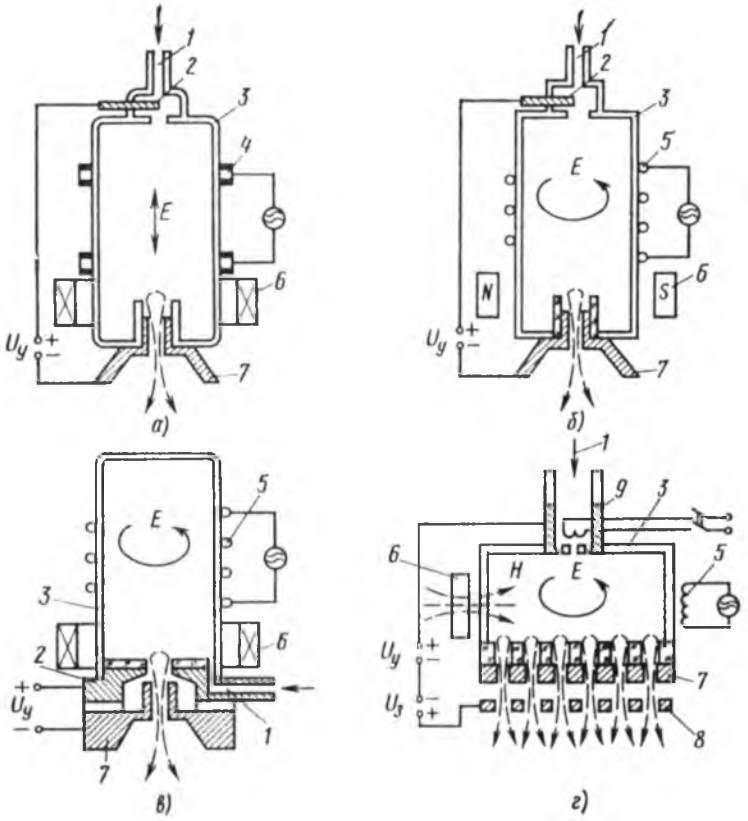


Рис. 18. Схематическое изображение ионных источников с высокочастотным разрядом:

а — Е-разряд с внешними электродами и аксиальным магнитным полем; *б* — Н-разряд с поперечным магнитным полем; *в* — Н-разряд с аксиальным магнитным полем и эмиссией ионов из анода; *г* — Н-разряд с поперечным магнитным полем и многолучевым извлечением ионного пучка;
1 — место ввода рабочего газа; *2* — анод; *3* — разрядная камера; *4* — возбуждающие разряд электроды; *5* — катушка возбуждающего разряд контура; *6* — магнит; *7* — зонд с каналами; *8* — замедляющий электрод; *9* — зажигатель; U_y — ускоряющее напряжение; $U_з$ — замедляющее напряжение

давление в области мишени даже в процессе бомбардировки (10^{-3}—10^{-4} Па), отсутствие воздействия плазмы (рентгеновского излучения) на мишень.

К недостаткам ионно-лучевых процессов относятся нестабильность ионной оптики, а следовательно, плотности тока и энергии, а также неэкономичность. При разработке различных ионно-лучевых источников основной задачей является повышение их эффективности (скорости и равномерности осуществления процесса), а также снижение их радиационного воздействия на элементы интегральных схем и энергоемкости. Особый интерес представляют многопучковые источники с осцилляцией электронов. Кон-

струирование этих источников идет в направлении увеличения диаметра пучка до 250 мм и более при большой равномерности распределения энергии по диаметру пучка в диапазоне энергий от нескольких десятков до нескольких сотен электронвольт.

7. НАГРЕВ ЛАЗЕРОМ

Лазер широко используют в электронной промышленности для напыления тонких пленок, подгонки резисторов гибридных интегральных схем, герметизации корпусов интегральных схем, сварки деталей и др.

Лазер представляет собой мощный источник когерентного направленного светового потока.

Работа лазера основана на дискретном изменении энергии электронов, ионов, атомов или молекул вещества, вызванном внешним источником возбуждения (накачкой). Возбужденные частицы вещества излучают на длине волны, характерной для данного вещества. Высокая монохроматичность, когерентность лазерного излучения позволяют фокусировать луч в пятно диаметром до нескольких микрометров. В зоне действия луча сосредотачивается поток колоссальной плотности — до 10^{16}—10^{24} Вт/м^2. При плотности потока 10^{10}—10^{12} Вт/м^2 плавится и испаряется любой тугоплавкий и сверхтвердый материал.

Обработку лучом лазера можно вести в любой прозрачной среде — твердой, жидкой, газообразной, в вакууме.

Достоинства лазерной обработки — отсутствие механического воздействия на изделие, высокая точность, быстрота настройки, ограниченность зоны термического воздействия, вызывающего структурные изменения обрабатываемого материала. Любой лазер имеет активную среду, помещенную в резонатор, и генератор накачки, возбуждающий атомы в среде. Оптический резонатор по торцам излучателя представляет собой систему двух плоских строго параллельных зеркал. Зеркало, через которое «выводится» излучение, делают полупрозрачным. При накачке в активной среде между зеркалами возникает состояние, когда количество атомов на верхнем энергетическом уровне превышает количество их на нижнем энергетическом уровне. Лавинный процесс излучения начинается в тот момент, когда хотя бы один возбужденный атом спонтанно излучает фотон в направлении, параллельном оптической оси. Этот фотон «вынуждает» другой возбужденный атом также испустить фотон и т. д.

Многократно отражаясь от зеркал резонатора, фотоны распространяются через активную среду и интенсифицируют развитие процесса. Геометрические размеры резонатора таковы, что световая волна, дважды отразившись от зеркал, сдвигается по фазе на величину, кратную целому периоду. Таким образом обеспечивается положительная обратная связь.

Если населенность верхнего уровня активной среды превышает некоторую пороговую величину, зависящую от коэффициента от-

ражения полупрозрачного зеркала, то процесс интенсивно нарастает. Затем вследствие индуцированных переходов населенность верхнего уровня понижается до пороговой величины стационарного режима генерации. Световые волны, параллельные оси резонатора, усиливаются и выводятся через полупрозрачное зеркало в виде узкого пучка когерентного света. Чтобы направленность излучения была высокой, необходима строгая параллельность зеркал резонатора. Монохроматичность излучения определяется резонансными свойствами отдельных атомов и молекул, которые избирательно поглощают или излучают свет определенной волны. Ее фаза, частота, поляризация и направление распространения совпадают с характеристиками волны внешнего электромагнитного поля накачки. Это и определяет когерентность излучения.

Рассмотрим устройство лазера. В качестве активного вещества в лазерах нашли применение кристаллы рубина и алюмоиттриевого граната (АИГ), газовые смеси гелия с неоном, азота с углекислым газом, а также полупроводниковые материалы (арсенид галлия и др.).

Основные элементы твердотельного лазера — оптическая головка, источник питания, блок поджига и синхронизирующее устройство. В оптическую головку входят активный элемент (его помещают между зеркалами резонатора) и источник накачки.

Для работы в импульсном режиме с большой частотой повторения, а также в непрерывном режиме наиболее пригоден лазер на алюмоиттриевом гранате с примесью неодима. Кристаллы АИГ отличаются высокой теплопроводностью, большой термической стойкостью и низким порогом возбуждения. Частота повторения импульсов доходит до 50 кГц, а выходная мощность в непрерывном режиме — 300 Вт при сравнительно высоком КПД (до 2,5 %).

Лазерные технологические установки СУ-1, УЛ-2М, УЛ-20М и другие независимо от назначения строят по типовой схеме, приведенной на рис. 19.

В качестве фокусирующей системы применяют стеклянные отражатели, покрытые серебром или алюминием, а также металли-

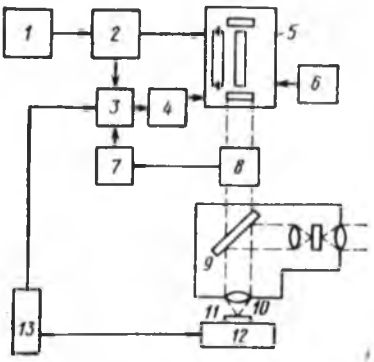


Рис. 19. Типовая схема лазерной технологической установки:

1 — зарядное устройство; *2* — емкостный накопитель; *3* — система управления; *4* — блок поджига; *5* — лазерная головка; *6* — система охлаждения; *7* — система стабилизации энергии излучения; *8* — датчик энергии излучения; *9* — оптическая система; *10* — сфокусированный луч лазера; *11* — обрабатываемая деталь; *12* — координатный стол; *13* — система программного управления

ческие охлаждаемые отражатели. Возможно применение линзовой оптики. Коэффициент отражения может достигать 95 %.

Управление лазерным лучом осуществляется по заданной программе.

В зависимости от плотности мощности лазерные потоки разделяют на потоки малой (менее 10^3 Вт/м^2), умеренной (от 10^9 до 10^3 Вт/м^2) и высокой плотности (от 10^{13} Вт/м^2). Для технологических целей в основном используют световые потоки умеренной мощности.

В качестве примера рассмотрим использование лазера для испарения осаждаемого на подложки вещества. Лазер находится снаружи установки для осаждения веществ в вакууме и через оптически прозрачное стекло световой поток направляется на испаряемое вещество, находящееся внутри вакуумной камеры. Обычно используют лазерный импульс мощностью 1—2 Дж продолжительностью $2 \cdot 10^{-7}$—$3 \cdot 10^{-8}$ с. В настоящее время созданы установки для напыления диэлектрических пленок на базе CO_2-лазеров мощностью 30 Вт, работающие в непрерывном и импульсном режимах. Кроме того, разработана установка получения металлических и полупроводниковых пленок, оснащенная твердотельными лазерами. При лазерном испарении металлических и полупроводниковых пленок эффективные скорости роста составляют приблизительно 10 мкм/мин. Методом лазерного напыления можно получать самые различные по структуре и толщине металлические, полупроводниковые и диэлектрические пленки.

Преимущества лазерного нагрева для испарения осаждаемого на подложки вещества:

высокая плотность светового потока сфокусированного излучения дает возможность испарять тугоплавкие материалы;

значительные скорости нагрева и испарения, позволяющие получать пленки сложного химического состава, например тугоплавких окислов, без изменения их стехиометрии;

использование коротких импульсов, позволяющих с большой точностью управлять процессом образования пленки и получать их толщиной 0,1 мкм.

Для напыления тонких пленок применяют импульсные лазеры, которые в сочетании с оптикой способны создать на испаряемой поверхности интенсивность излучения 10^3 Вт/м^2. Наиболее перспективны лазеры на стекле с неодимом, на CO_2 с поперечным возбуждением, а также лазеры на алюмоиттриевом гранате.

Особый интерес представляют установки, не требующие создания вакуума, для точной резки металла и обработки твердых материалов, включая алмаз, выполнения отверстий в керамике, локального нагрева и пайки изделий. Кроме этого, выпускаются также установки многоцелевого назначения, управляемые ЭВМ.

ГЛАВА 3

СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ВАКУУМА И РАСЧЕТ ВАКУУМНЫХ СИСТЕМ

1. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Под вакуумом понимают такое состояние разреженного газа, которому соответствует область давления ниже 10^5 Па, т. е. ниже атмосферного давления. В зависимости от степени разрежения различают низкий, средний, высокий и сверхвысокий вакуум. Области давлений газов, соответствующие различному вакууму, показаны на рис. 20.

Схема вакуумной системы показана на рис. 21. Она имеет высоко- и низковакуумные насосы, устройства, регулирующие давление и поток газа в вакуумной системе, ловушки паров, рабочей жидкости, а также приборы для измерения вакуума. Ловушки, устанавливаемые над насосами, предохраняют откачиваемый объем от попадания в него паров рабочей жидкости насосов. Вакуумные клапаны и затворы позволяют соединять и разобщать элементы вакуумной системы, а также регулировать поток газа в вакуумной системе. Трубопровод с клапаном, соединяющий низковакуумный насос непосредственно с рабочей камерой, носит название вспомогательной (байпасной) линии (на рис. 21 участок между точками *а* и *б*).

Байпасная линия позволяет создавать начальное давление в объекте, необходимое для начала работы диффузионного насоса без его выключения.

Вакуумная система вакуумно-напылительного оборудования для получения пленок должна обеспечивать:

минимальное время пускового периода и откачного цикла;

воспроизводимость параметров тонкопленочных элементов;

эффективную откачку в широком интервале давлений при переменной газовой нагрузке;

контролируемый напуск азота, аргона и других газов.

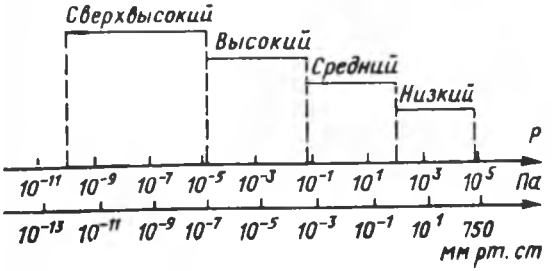


Рис. 20. Области давлений газов, соответствующие различному вакууму

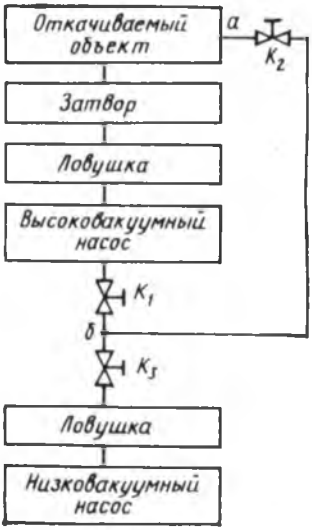


Рис. 21. Схема вакуумной системы:
K_1—K_3 — вентили

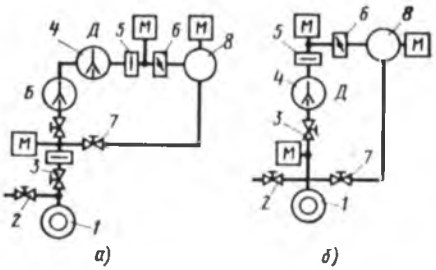


Рис. 22. Схемы высоковакуумных систем:
а — промышленной установки; *б* — лабораторной установки; *Б* — бустерный насос; *Д* — диффузионный насос; *М* — манометр;
1 — механический насос; *2*, *3* и *7* — краны; *4* — диффузионный насос; *5* — ловушка; *6* — затвор; *8* — рабочая камера

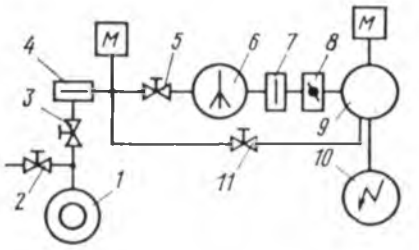


Рис. 23. Схема высоковакуумной прогреваемой системы промышленной установки:
1 — механический насос; *2*, *3*, *5* и *11* — краны; *4*, *7* — ловушки; *6* — диффузионный насос; *8* — затвор; *9* — рабочая камера; *10* — источник разряда

При этом она должна иметь наибольшие габаритные размеры и массу, высокую надежность в эксплуатации, сравнительно низкую стоимость и малую потребляемую мощность.

По степени создаваемого разрежения вакуумные установки подразделяют на низковакуумные, высоковакуумные и сверхвысоковакуумные. Запорную арматуру и соединения элементов низковакуумных установок изготавливают с уплотнителями, выполненными из резины или эластомеров, а высоко- и сверхвысоковакуумных установок — с уплотнителями из металла. В высоковакуумных установках желателен прогрев всей высоковакуумной части установки.

Схемы высоковакуумных систем промышленных и лабораторных установок с использованием диффузионного и бустерного (повышающего давление) насосов показаны на рис. 22.

При использовании металлических уплотнителей во фланцевых соединениях и прогрева возможно получение остаточного давления до 10^{-8} Па.

Схема высоковакуумной прогреваемой системы промышленной установки приведена на рис. 23.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ВАКУУМНЫХ НАСОСОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Получение вакуума возможно удалением газа из откачиваемого объема за пределы вакуумной системы или связыванием его в вакуумной системе. Вакуумные насосы, которые откачивают газ отдельными порциями в результате периодического изменения объема и положения рабочей камеры, называют объемными вакуумными насосами; к ним отюсят механические насосы.

Вакуумные насосы, в которых вакуум получается за счет связывания газа в вакуумной системе, называют сорбционными насосами. Газ в сорбционных насосах может связываться поглотителем (геттером) или сорбироваться и конденсироваться на охлаждаемой поверхности.

Классификация вакуумных насосов по принципу действия приведена на рис. 24.

К основным характеристикам вакуумных насосов относят начальное давление (давление запуска), максимальное (критическое) выпускное давление, наибольшее рабочее давление, предельное остаточное давление, а также быстроту действия насоса и его производительность.

Начальное давление (давление запуска) — давление, с которого насос начинает нормально работать.

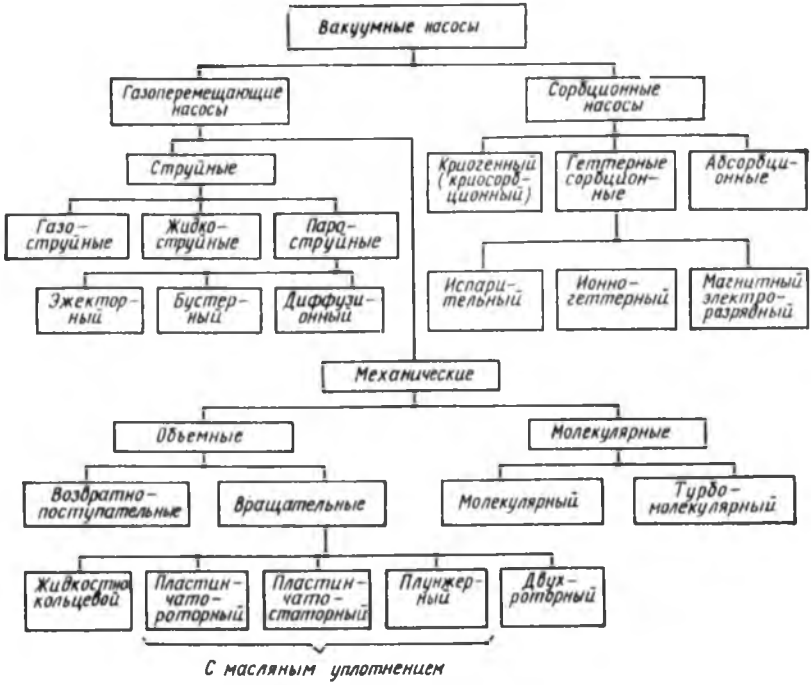


Рис. 24. Классификация вакуумных насосов

Максимальное (критическое) выпускное давление — давление на выпускной стороне насоса, при котором насос еще может осуществлять откачку.

Наибольшее рабочее давление — давление на входном патрубке насоса, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

Предельное остаточное давление — наименьшее давление, которое может быть достигнуто с помощью данного насоса.

Быстрота действия насоса — объем газа при данном давлении, откачиваемый в единицу времени во входном патрубке насоса.

Производительность насоса — количество газа, откачиваемое насосом в единицу времени.

3. МЕХАНИЧЕСКИЕ НАСОСЫ С МАСЛЯНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Вращательный вакуумный насос с масляным уплотнением используют для предварительного разрежения в вакуумной системе и создания форвакуумного давления на выходе высоковакуумных насосов. Наибольшее распространение получили три типа вращательных насосов с масляным уплотнением: пластинчато-роторные, пластинчато-статорные и плунжерные насосы. Механические насосы производят откачку, начиная с атмосферного давления.

Пластинчато-роторный насос. На рис. 25, *а — г* приведены схема устройства и этапы работы пластинчато-роторного насоса.

Корпус насоса *1* представляет собой полый цилиндр, внутри которого вокруг оси, смещенной относительно оси корпуса, вращается ротор *2*. В сквозной прорези ротора размещены две пластины *3*. Пластины плотно прижимаются к корпусу насоса пружиной *4*. Полезный объем рабочей камеры разделен на три полости: *I* — полость всасывания; *II* — полость перемещения газа; *III* — полость сжатия и вытеснения газа. При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, полость *I* увеличивается и газ поступает в нее через впускной патрубок *7*, а полость *II* уменьшается и сжатый газ выбрасывается через выпускной патрубок *5* в атмосферу. Выпускной патрубок *5* снабжен клапаном *6*.

В пластинчато-роторном насосе за один оборот ротора происходит два цикла откачки, т. е. отделяются от откачиваемого объе-

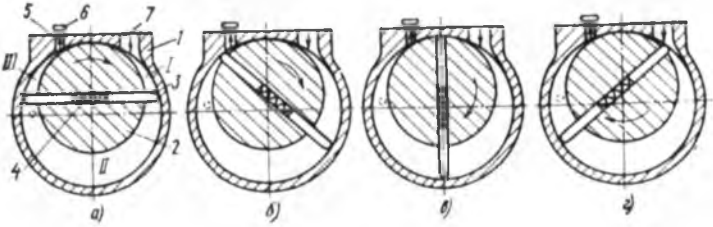


Рис. 25. Схема устройства и этапы работы пластинчато-роторного вакуумного насоса

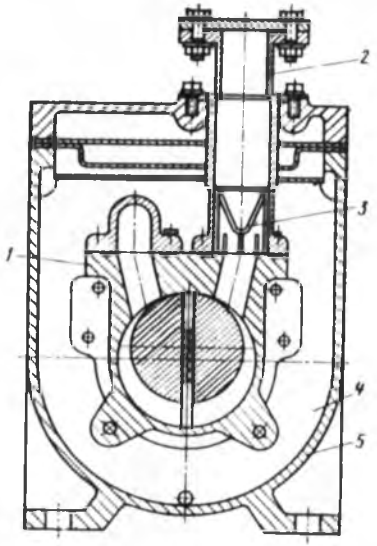


Рис. 26. Механический вакуумный насос ВН-1-2:

1 — откаточной механизм; *2* — впускной патрубок; *3* — защитная сетка — фильтр; *4* — масляный резервуар; *5* — корпус насоса

ма и вытесняются из насоса две порции газа. Как видно из конструкции насоса, между вращающимся ротором и статором, а также между пластинами и статором имеются зазоры, по которым газ со стороны выхлопа может поступать на сторону всасывания. Уплотнение зазоров, предотвращающее перетекание газа, осуществляется вакуумным маслом марок ВМ-4 и ВМ-6 (толщина масляной пленки 0,05—0,1 мм), поступающим из масляного резервуара. В насосах погружного типа, к которым относятся пластинчато-роторный и пластинчато-статорный насосы (рис. 26), откачной механизм полностью погружен в масляную ванну, являющуюся корпусом насоса. Ведущий вал откачного механизма через отверстие в стенке корпуса выводится наружу. Неподвижные соединения деталей откачного механизма не герметизируются. Масло, просачиваясь через зазоры и заполняя их, защищает откачной механизм от натекания воздуха и обеспечивает смазывание трущихся деталей механизма. Предельное остаточное давление насосов с масляным уплотнением определяется конструкцией насоса и свойствами рабочей жидкости и равно 1,33 Па, а для двухступенного насоса 0,133 Па. Быстрота действия пластинчато-роторных насосов в интервале давлений 10^2—10^5 Па — от 0,21 л/с для ВН-494 до 3 л/с для насоса НВР-3Д.

4. СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОГО ВАКУУМА

Диффузионные насосы. Работа диффузионного насоса основана на передаче импульса движения струей паров рабочей жидкости, вырывающейся из сопла, молекулам откачиваемого газа в результате их непосредственного контакта и диффузии молекул откачиваемого газа в струю паров рабочей жидкости. Схема диффузионного насоса показана на рис. 27. Из сопла *1* истекает струя пара рабочей жидкости, полученная нагревом рабочей жидкости в насосе с помощью нагревателя *6*. Проходя через диффузионное сопло *1*, струя паров рабочей жидкости приобретает значительную скорость, захватывает молекулы откачиваемого газа и конденсируется на корпусе насоса, охлаждаемом водой и являющемся поверхностью конденсации. Молекулы газа диффундируют

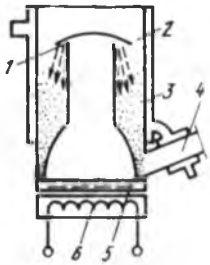


Рис. 27. Схема диффузионного насоса:

1 — диффузионное сопло; *2* — зазор между соплом и корпусом насоса; *3* — поверхность конденсации (корпус, охлаждаемый водой); *4* — выпускной патрубок; *5* — рабочая жидкость; *6* — нагреватель

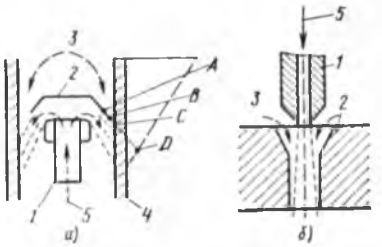


Рис. 28. Сопла диффузионного насоса:

а — диффузионное сопло; *б* — эжекторное сопло;
1 — направляющая трубка; *2* — приемная трубка, *3* — направление движения молекул откачиваемого газа; *4* — корпус насоса; *5* — направление движения паров

в струю пара и при столкновении с молекулами пара приобретают дополнительные импульсы количества движения в направлении движения струи и доставляются на поверхность конденсации. При конденсации пары рабочей жидкости в виде жидкости стекают обратно в насос, а молекулы откачиваемого газа десорбируются с поверхности конденсации и оказываются в пространстве под струей паров рабочей жидкости. Из рассмотрения процесса откачки диффузионным насосом можно сделать следующие выводы:

предельный вакуум определяется давлением паров рабочей жидкости при температуре конденсации паров рабочей жидкости;

насос работает нормально, если течение откачиваемого газа в диффузионном зазоре *2* (между стенкой и соплом) является молекулярным, так как при вязкостном течении свободное расширение струи пара рабочей жидкости оказывается затрудненным. Поэтому для диффузионного насоса указывают наибольшее выпускное давление, при котором еще возможна нормальная работа насоса, обеспечивающая молекулярный режим движения молекул откачиваемого газа в зазоре *2*.

Многоступенчатые насосы имеют последовательно соединенные сопла. При этом одновременно можно получить высокое быстродействие и наибольшее выпускное давление. В одноступенчатых насосах ограниченная возможность улучшения параметров.

В многоступенчатых насосах принцип последовательной работы состоит в размещении нескольких сопл с разными характеристиками в одном металлическом корпусе. Например, в первой ступени со стороны предварительного разрежения помещают сопло с малой быстротой действия, но с наибольшим выпускным давлением (эжекторное сопло), во второй ступени — сопло с большой быстротой действия, но зато с малым выпускным давлением (диффузионное сопло). Выбор сопл основан на следующем условии:

$$S_1 p_1 = S_2 p_2 = S_3 p_3,$$

где S_1p_1, S_2p_2, S_3p_3 — количество газа, откачиваемое каждым из 3-х имеющихся в насосе сопл; S_1, S_2, S_3 — быстрота действия сопл; p_1, p_2, p_3 — давления срыва струи.

При соблюдении этого условия насос будет иметь большие быстроту действия и величину выпускного давления.

На рис. 28, *а* схематично изображено диффузионное сопло. Действие диффузионного сопла основано на диффузии молекул газа в струю пара.

Рассматривая откачивающее действие струи паров рабочей жидкости, можно выделить два участка.

Участок *AB* — здесь плотность струи настолько велика, что в нее не может продиффундировать подавляющее большинство молекул откачиваемого газа, прошедших через впускной патрубок насоса, поскольку при столкновениях они отражаются тяжелыми молекулами пара. Откачивающим действием этого участка паровой струи можно практически пренебречь.

Участок BC — на этом участке струи за счет расширения струи плотность пара становится относительно низкой, что облегчает диффузию в него откачиваемого газа и, по сути дела, именно на этом участке осуществляется перекачка газов в область предварительного разрежения. Таким образом, если корпус насоса имеет цилиндрическую форму, то молекулы откачиваемого газа, находящегося над паровой струей, попадают к ее активному участку только через достаточно узкий пристеночный кольцевой зазор.

Быстроту действия насоса можно повысить, увеличив ширину кольцевого зазора конусообразным расширением верхней части корпуса насоса на участке *CD* (рис. 28, *а*).

На базе стандартного насоса Н5С создан насос с углом конусности 22°. В результате быстрота действия насоса увеличилась в 2 раза (до 1300 л/с) без изменения габаритных размеров насоса и подводимой мощности.

Эжекторное сопло (рис. 28, *б*) состоит из направляющей трубки *1* и приемной трубки *2*. Между струей паров рабочей жидкости, выходящей из направляющей трубки *1*, и поверхностью приемной трубки *2* образуется узкая щель. Газ проникает в нее и соприкасается со струей пара. Под действием силы трения, возникающей между струей пара и прилегающим к ней ближайшим слоем газа, последний увлекается струей пара. При этом происходит передача движения соседнему слою и т. д. Так как скорость движения слоев по мере их удаления от поверхности струи быстро падает, то щель надо выбирать достаточно узкой, чтобы через нее не проникал встречный поток газа. Чем уже щель, тем больше выпускное давление (давление срыва струи) и тем меньше быстрота действия. Быстрота действия эжекторного сопла зависит от давления откачиваемого газа. Ее величина оказывается очень малой в области низких давлений, так как при сильно разреженном газе столкновения между молекулами газа становятся весьма редкими и о вязкостном «захвате» газа струей пара уже говорить нельзя.

Корпус насоса выполняют из стали, а маслопроводы — из меди, алюминия или коррозионно-стойкой стали. Применение этих материалов объясняется тем, что небольшие величины степени черноты снижают передачу тепла излучением охлаждаемому водой корпусу, а большая теплопроводность позволяет поддерживать температуру маслопровода (паропровода) по всей его высоте, исключая конденсацию паров. Последовательно с диффузионным насосом устанавливают форвакуумный насос, способный воспринять поток откачиваемого газа и обеспечить на выходе диффузионного насоса вакуум, необходимый для его нормальной работы.

В настоящее время разработаны паромасляные насосы самой различной производительности с быстротой действия от $1 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^5$ л/с.

Рабочая жидкость диффузионных насосов должна иметь:

низкую упругость пара при комнатной температуре;

высокую термическую стабильность при рабочих температурах;

высокую термоокислительную стабильность (стойкость к окислению при соприкосновении в нагретом виде с атмосферным воздухом);

низкую поглощательную способность по отношению к газам.

Кроме того, она должна быть химически инертной и нетоксичной.

Этим требованиям отвечают отечественные рабочие жидкости, основные свойства которых приведены в табл. 6.

Таблица 6. **Некоторые характеристики рабочих жидкостей высоковакуумных диффузионных насосов**

Наименование рабочей жидкости	Плотность, кг/м³	Давление пара при 20 °С, Па	Вязкость кинематическая при 50° С 10^{-4}, м²/с
ВМ-1	870	$5{,}3 \cdot 10^{-6}$—$2{,}66 \cdot 10^{-7}$	65—69
Сложный эфир 5Ф4Э	1200	$1{,}3 \cdot 10^{-9}$	130
Кремнийорганические ПЭС-В-1 (ВКЖ-94-А)	970	$6{,}6 \cdot 10^{-6}$	16—33
ФМ-1	1096	$1{,}3 \cdot 10^{-8}$	35—37
ПФМС-2	1050—1070	$6{,}6 \cdot 10^{-7}$—$9{,}3 \cdot 10^{-5}$	8—13

При работе диффузионного насоса обратный поток паров рабочей жидкости из насоса в откачиваемый объем составляет $8 \cdot 10^{-5}$ мг/см² мин. Для защиты откачиваемого объема от загрязнения парами рабочей жидкости и продуктами ее разложения применяют конденсационные (вымораживающие) ловушки и маслоотражатели.

Предельный вакуум диффузионных насосов без применения вымораживающих ловушек составляет 10^{-4} Па, а при их использовании он находится в пределах 10^{-6}—10^{-7} Па.

К достоинствам диффузионного насоса можно отнести простоту конструкции, низкую стоимость, быстрое восстановление в систе-

ме требуемого разрежения при значительных изменениях газовой нагрузки, сравнительно невысокие удельные энергозатраты, надежность и удобство в эксплуатации.

К недостаткам диффузионного насоса при использовании в качестве рабочих жидкостей минеральных масел следует отнести наличие обратного потока паров рабочей жидкости, для устранения которого приходится применять вымораживающие ловушки, снижающие эффективную быстроту действия насоса в 3—4 раза; возможность окисления и разложения минеральных масел марок ВМ-1, ВМ-2 и ВМ-5, наиболее часто используемых в качестве рабочих жидкостей, при аварийном прорыве воздуха в откачиваемый объем.

Для получения высокого вакуума, помимо рассмотренных выше диффузионных насосов, используют молекулярный, турбомолекулярный, геттерно-ионный, электроразрядный или криогенный насосы.

Турбомолекулярные насосы. Их применяют для получения сверхвысокого «безмасляного» вакуума (до $6{,}6 \cdot 10^{-7}$ Па). При этом для нормальной работы турбомолекулярного насоса необходимо последовательное включение вращательного насоса с масляным уплотнением. Турбомолекулярный насос (рис. 29) представляет собой многоступенчатый осевой компрессор, имеющий жестко укрепленные на корпусе *1* статорные диски *2* и вращающиеся диски *5*, укрепленные на роторе *4*. Статорные и роторные диски, в которых выполнены радиальные косые (под углом 15—40° к плоскости диска) пазы, образуют рабочий механизм насоса. Ротор вращается электродвигателем 6 со скоростью более 10^3 об/мин. Насос соединяется с откачиваемым объемом через впускной па-

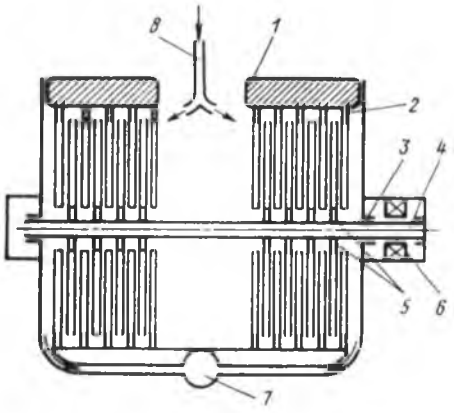


Рис. 29. Схема турбомолекулярного насоса:

1 — корпус насоса; *2* — статорные диски, укрепленные на корпусе; *3* — подшипники ротора; *4* — ротор; *5* — диски на роторе; *6* — привод; *7* — выпускной патрубок *8* — ввод откачиваемого газа

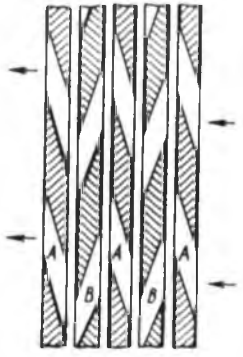


Рис. 30. Схема рабочего механизма турбомолекулярного насоса:

A — статорные диски с пазами; *B* — роторные диски с пазами

трубок *8*. Выпускной патрубок *7* соединяется с форвакуумным насосом. На опорные подшипники вала ротора *4* маслонасосом (на рисунке он не показан) подается смазка. Схема рабочего механизма турбомолекулярного насоса приведена на рис. 30. В качестве роторных дисков используют металлические шайбы толщиной в несколько миллиметров. Пазы в дисках статора являются зеркальным отражением пазов роторных дисков. В средней (высоковакуумной) части насоса устанавливают диски с пазами, обеспечивающими высокую производительность насоса. Наружные диски также имеют пазы, позволяющие получить более высокий коэффициент компрессии. Пазы имеют длину всего несколько миллиметров, вследствие чего коэффициент компрессии каждой пары дисков невелик, но поскольку в насосе работает большое число дисковых пар, то суммарный коэффициент компрессии достигает значительной величины. Степень сжатия турбомолекулярных насосов составляет 10^2—10^3 по водороду, 10^7—10^{12} по азоту, 10^{15} по углеводородам и возрастает с увеличением частоты вращения ротора. Рабочий диапазон выпускных давлений турбомолекулярного насоса 1—10^{-7} Па. В широком диапазоне давлений (10^{-1}—10^{-6} Па) быстрота действия постоянна и для насоса ТМН-100 составляет 100 л/с, для ТМН-200 — 200 л/с и для ТМН-5000 — 5000 л/с. Остаточное давление легких газов и паров воды определяет остаточное давление турбомолекулярных насосов, составляющее у небольших насосов 10^{-8} Па, а у крупных — до 10^{-9} Па.

К достоинствам турбомолекулярных насосов можно отнести: возможность откачки конденсируемых паров; быстрый запуск (10—15 мин); нечувствительность к резкому повышению давления вплоть до атмосферного; высокая степень сжатия газов с большой молекулярной массой ($M \geqslant 44$), что обеспечивает практически безмасляный вакуум при давлении на форвакууме 1—13 Па; высокое предельное разрежение (10^{-7} Па).

К недостаткам турбомолекулярных насосов можно отнести: сложность устройства, необходимость разборки насоса при его очистке, резкое изменение коэффициента компрессии по тяжелым газам при снижении частоты вращения ротора, сравнительно высокая стоимость, значительные габаритные размеры.

Турбомолекулярные насосы используют для высоковакуумной откачки и для длительной работы в области среднего вакуума, например в установках ионного распыления и травления материалов.

Магниторазрядные насосы. Широкое распространение магниторазрядных насосов в промышленности объясняется их высокими техническими характеристиками, простотой эксплуатации и обслуживания, большим ресурсом и надежностью в работе. Схема магниторазрядного насоса показана на рис. 31. Плоские титановые катоды *1* и анод *2*, состоящий из ячеек и выполненный из коррозионно-стойкой стали, образуют электродный блок, который помещают в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом *3*. При приложении разности потенциалов (5—7 кВ) между электродами разрядного блока, находящегося в вакууме, возникает элек-

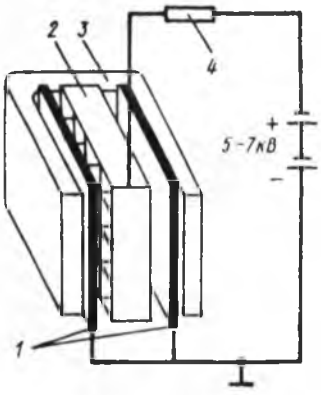


Рис. 31. Схема диодного магниторазрядного насоса:
1 — катоды; *2* — анод; *3* — постоянный магнит с магнитопроводом; *4* — балластное сопротивление

трический разряд. Под действием магнитного и электрического полей электроны движутся по спирали вокруг оси разрядной ячейки. На своем пути они ионизируют газ. Образующиеся положительные ионы, бомбардируя катод, распыляют материал (титан) катода. Титан осаждается на аноде. Активные газы, попадая на непрерывно напыляемую пленку титана, поглощаются ею. Катоды также поглощают газы, но из-за постоянного распыления их роль последних в процесс откачки активных газов незначительна.

Отечественной промышленностью выпускаются неохлаждаемые магниторазрядные диодные насосы типа НЭМ с быстротой действия от 10 до 7000 л/с, охлаждаемые диодные насосы типа НОРД с быстротой действия от 10 до 1000 л/с и триодные насосы МаРТ и ТРИОН-150 соответственно с быстротой действия 30 и 150 л/с.

Магниторазрядные насосы запускаются при давлении 1 Па и устойчиво работают в интервале давлений $1{,}3\cdot10^{-3}$—$1{,}3\cdot10^{-7}$ Па, а насосы с охлаждаемыми электродами — в диапазоне давлений $1{,}3\cdot10^{-1}$—$1{,}3\cdot10^{-9}$ Па. Предельный вакуум магниторазрядных насосов определяется суммарным временем и режимом его работы, родом откачиваемого газа, а также загрязненностью насоса углеводородами. При этом он составляет величину порядка $1{,}3\cdot10^{-8}$ Па.

Ресурс магниторазрядных насосов при рабочем давлении $1\cdot10^{-4}$ Па составляет: неохлаждаемые диодные насосы — более $150\cdot10^{3}$ ч, НОРД-250 — более $100\cdot10^{3}$ ч, НОРД-10 — более $65\cdot10^{3}$ ч, ТРИОН-150 — более $70\cdot10^{3}$ ч.

Криогенные насосы. В этом типе насосов вакуум в откачиваемом объеме создается посредством вымораживания остаточных газов на охлажденной жидким хладагентом поверхности (криопанели). Криогенные (конденсационные) насосы имеют сравнительно малый пусковой период. Для получения высокого и сверхвысокого вакуума нет необходимости длительного прогрева рабочего объема установки. Конструкции насосов достаточно просты и основной проблемой их эксплуатации является получение, использование и утилизация низкотемпературных хладагентов. В качестве хладагентов используют азот, водород и гелий, имеющие соответственно температуру кипения 70, 20, 4 и 4,2 К.

Быстрота откачки насоса практически постоянна в широком диапазоне давлений. Насос способен обеспечить предельный вакуум до 10^{-7} Па при полном отсутствии паров рабочей жидкости в откачиваемом объеме. По существу, криогенный насос является

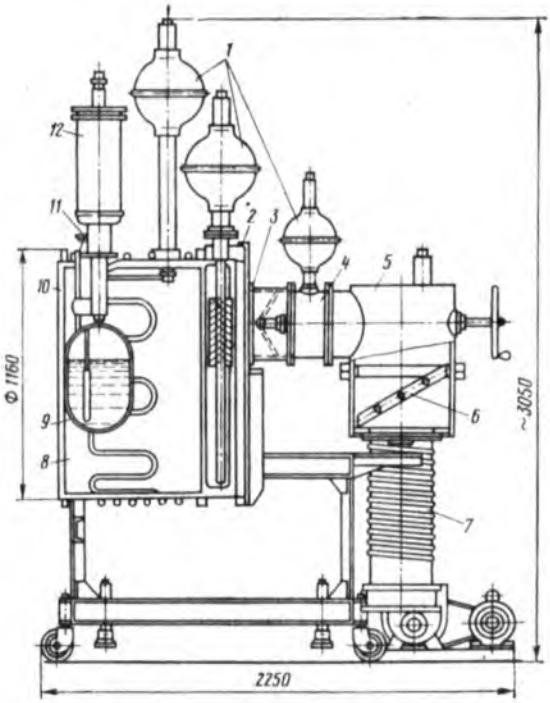


Рис. 32. Схема криогенного насоса ВК-40

единственным откачным средством, которое при своей работе не вносит загрязнений в откачиваемый объем. Специфической особенностью криогенной откачки является резко выраженная зависимость парциального давления газов от температуры. Например, при увеличении температуры на 1 °С (с —270 до —269 °С) парциальное давление H_2 увеличивается в 100 раз (с 10^{-8} до 10^{-6}). Поэтому, когда температура поверхности криопанели насоса возрастает, что происходит вследствие образования слоя конденсата паров воды или газа с малой теплопроводностью, создаваемый насосом вакуум снижается.

На рис. 32 приведена схема криогенного насоса ВК-40. Сосуд *9* с жидким водородом для изоляции от корпуса *10* окружен экраном *8*, охлаждаемым жидким азотом с помощью хладопровода, соединенного с сосудом Дьюара *1*. В корпусе установлена также азотная ловушка *2* с медным экраном. Жидкий водород подается в сосуд *9* через дроссельный вентиль *11* из охладителя *12*.

Создание предварительного разряжения и откачки не конденсирующихся при температуре жидкого водорода газов осуществляется механическим и диффузионным *7* насосами. Для предотвращения попадания в камеру сверхвысокого вакуума паров диффузионного масла последовательно через переходник *5* установлены

водяная ловушка *6* и азотная ловушка *4*, соединенные с корпусом *10* насоса вентилем *3*.

Насос ВК-40 создает предельный вакуум 10^{-8} Па при расходе жидкого водорода и азота соответственно 0,4 и 10—20 л/с. Скорость откачки — 40 м^3/с при давлении 10^{-3}—10^{-5} Па.

По сравнению с другими безмасляными средствами откачки криогенные насосы обладают следующими достоинствами:

высокой быстротой действия при сравнительно малых габаритных размерах и низких энергозатратах на единицу быстроты действия;

возможностью помещать криопанель непосредственно в откачиваемый объем, что позволяет увеличить эффективность откачки;

широким диапазоном рабочих давлений (10^2—10^{-7} Па) и возможностью откачки химически активных и агрессивных газов:

простотой процесса регенерации, не требующей высокотемпературного прогрева.

К недостаткам криогенных насосов следует отнести:

резко выраженную селективность при откачке газовых смесей и существенное изменение предельного вакуума даже при значительном повышении температуры криопанели;

необходимость активировать криопанель сорбентом (Al_2O_3 специальные сорта углей) или использовать вспомогательные средства откачки для удаления водорода, гелия и неона, парциальное давление которых определяет в основном предельный вакуум, создаваемый криогенным насосом.

5. ОТКАЧКА ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ГАЗОВ

Для проведения плазмохимических и ионно-химических процессов необходима откачка химически активных и агрессивных газов. Многие из используемых газов токсичны и, кроме того, могут образовывать соединения, которые являются токсичными (например, $COCl_2$, фтор, COF_2, соединения мышьяка и др.). Ряд газов (силан, водород и др.) образуют с воздухом взрывоопасные соединения. Галогенсодержащие газы быстро разлагают используемые в насосах рабочие жидкости и усиливают коррозию конструктивных элементов вакуумных систем (в первую очередь насосов). Части насоса, погруженные в масло и покрытые тонкой масляной пленкой, наименее подвержены коррозии, в то время как выпускной патрубок механического насоса и прилегающая к нему камера сжатия подвергается сильной коррозии. Причем наиболее агрессивным является водный раствор HCl, который постепенно накапливается в масле. Для защиты насоса от коррозии рекомендуется уменьшать поток химически активных газов, разбавляя их осушенным азотом, и производить как можно более частую замену масла, особенно после длительного перерыва в работе.

Наиболее радикальным средством, продлевающим срок службы насоса, является замена масел, изготавливаемых из нефти, синтетическими маслами. Синтетические масла достаточно дороги, по-

этому в ряде случаев предпочитают работать на маслах, изготавливаемых из нефти, производя их очистку с помощью адсорбционных фильтров на основе активированного угля, силикагелей и других веществ.

Применение фильтров эффективно в том случае, если при проведении технологического процесса не образуются твердые частицы с размерами зерна менее 1 мкм.

Фильтрация частиц с размерами менее 1 мкм чрезвычайно затруднена, поскольку приходится делать сетки с ячейками менее 0,5 мкм, что резко снижает скорость откачки системы. Накапливание мелкодисперсных частиц в масле приводит к образованию сгустков этих частиц, которые затрудняют прохождение масла через фильтры, ухудшая смазывание трущихся частей.

Наиболее целесообразно использовать газобалластные двухступенчатые насосы золотникового (плунжерного) типа, поскольку последние обладают наиболее высокой производительностью, обеспечивают повышенную коррозионную стойкость. Для откачки больших потоков химически активных газов можно использовать двухроторные насосы без масляного уплотнения, имеющие зазоры между роторами и корпусом $\sim 0{,}3$ мм, через которые проходит мелкодисперсная пыль.

Перед откачкой кислорода необходимо перебрать насос и полностью очистить все конструктивные элементы вакуумной системы, затем залить в него рабочую жидкость, стойкую к длительному воздействию кислорода.

Режимы откачки таких газов, как H_2, CH_4, C_2H_2, SiH_4, SiH_2Cl_2, должны быть организованы таким образом, чтобы в рабочем объеме установки не могли образоваться взрывоопасные смеси. При этом должна быть обеспечена полная герметичность систем напуска газов, вентилей, затворов, ловушек, фильтров, чтобы не допустить утечки газов. При разборке реакторов, конструктивных элементов вакуумных систем и замене рабочих жидкостей должны соблюдаться необходимые меры предосторожности по защите обслуживающего персонала от воздействия химически активных газов.

Для откачки активных газов возможно использование двух насосов, например, титанового сублимационного насоса, имеющего значительную производительность, а также магнитно-электроразрядного, поглощающего инертные газы и углеводороды. Соотношение быстроты откачки этих насосов выбирают равным 1 : 10. Такая система обеспечивает за сравнительно короткое время вакуум в больших объемах до 10^{-6} Па без применения высокотемпературного прогрева. Известны и другие комбинации насосов, такие, как диффузионный и криогенный, геттерно-ионный и турбомолекулярный.

6. МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Вакуумная система содержит активные элементы — насосы высокого, сверхвысокого и предварительного вакуума, отка-

чивающие газ из объема, а также пассивные элементы — вакуумпроводы, краны, вентили, ловушки и т. п., оказывающие сопротивление перетеканию откачиваемого газа.

Расчет вакуумной системы производят в следующей последовательности:

1. Оценивают суммарный поток газа Q, который выделяется в откачиваемом объеме в единицу времени:

$$Q = Q_г + Q_д + Q_{нат}.$$

Полный поток газа за счет газовыделения материала (графит, молибден, вольфрам)

$$Q_г = 1{,}01 \cdot 10^5 q_г I/t,$$

где $q_г$ — газовыделение, м³/кг; I — масса изделий, кг; t — время цикла, с.

При этом полагают, что газовыделение происходит равномерно в течение всего процесса.

Десорбция газа происходит с поверхности всех металлических элементов установки — стенки камеры, экранов, технологической оснастки, уплотнений:

$$Q_д = 1{,}01 \cdot 10^5 q_п/F,$$

где $q_п$ — удельное газоотделение поверхности, м³/(м²·с); F — площадь поверхности, м².

Натекание газов из атмосферы в рабочую камеру ($Q_{нат}$) зависит от качества изготовления оборудования и может быть найдено только экспериментально или принято в размере максимально допустимого значения в зависимости от требований технологического процесса ($5 \cdot 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-5}$ м³ Н/(с·м²)).

2. Рассчитывают необходимую скорость откачки рабочей камеры по уравнению

$$S_р = 1{,}01 \cdot 10^5 \left(\frac{q_г I}{P_р t} + \frac{q_п F}{P_р} \right) + \frac{Q_н}{P_р} + \frac{Q_т}{P_р}.$$

Скорость откачки рабочей камеры связана с быстротой действия насоса уравнением

$$1/S_р = 1/S_н + 1/U.$$

3. Если диаметр, длина и конфигурация высоковакуумной линии заданы, то выполняют расчет пропускной способности вакуумпровода, а затем по основному уравнению вакуумной техники определяют $S_н$.

Характер движения газа устанавливают по произведению среднего давления $\bar{p}$ [Н/м²] на данном участке вакуумпровода и диаметра вакуумпровода d [м]. Для молекулярного режима $\bar{p}d \leqslant \leqslant 4 \cdot 10^{-3}$ [Н·м/м²]. Расчеты пропускной способности элементов вакуумпровода в молекулярном режиме проводят по уравнениям:

а) пропускная способность прямого участка круглого вакуумпровода длиной l

$$U_м = 121d^3/l;$$

б) пропускная способность круглого вакуумпровода длиной l с n числом поворотов на 90°

$$U_м = 121d^3/(l + n1{,}33d);$$

в) пропускная способность диафрагмы (или перехода от более широкого сечения F к более узкому F_0)

$$U_д = 116F_0/(1 - F_0/F).$$

Для диафрагмы круглого сечения при $F > F_0$

$$U_д = 91d_0^2.$$

При расчете суммарной пропускной способности последовательно соединенных элементов вакуумпровода используют соотношение

$$1/U_0 = 1/U_1 + 1/U_2 + 1/U_3 + \ldots + 1/U_n.$$

Для вязкостного режима $\bar{p}d \geqslant 1{,}7$ [Нм/м²]. В вязкостном режиме сопротивления диафрагм и изгиба трубопровода малы, поэтому в расчетах учитывают только пропускную способность линейных участков вакуумпроводов

$$U_в = 1{,}35 \cdot 10^3 d^4 \bar{p}/l.$$

При $4 \cdot 10^{-3} < \bar{p}d < 1{,}7$ имеет место молекулярно-вязкостный режим, в котором пропускная способность может быть рассчитана по уравнению

$$U_{м.в} = U_м + U_в.$$

Так как высоковакуумный диффузионный насос сравнительно не дорог, то высоковакуумные коммуникации могут снижать $S_н$ на 40—60 % ($S_н$ выбирают равным 1,7—2,5 $S_э$). Стоимость пароструйного насоса приблизительно равна стоимости высоковакуумной коммуникации, в состав которой входят дорогостоящий высоковакуумный затвор и азотная ловушка.

Механические насосы дороже простых низковакуумных коммуникаций, состоящих обычно из труб диаметром 20—200 мм, поэтому в низковакуумных коммуникациях не следует допускать снижения быстроты откачки механического насоса более чем на 5—10 % ($S_н$ механических насосов выбирается 1,05—1,1 $S_р$).

4. По формуле

$$S_н = S_э/(1 - S_э/U)$$

определяют необходимую быстроту откачки основным насосом.

5. В зависимости от требований, предъявляемых к установке, и от диапазона рабочих давлений в ней выбирают вид насоса (или агрегата).

6. Конкретную марку насоса определяют по рассчитанной быстроте откачки $S_н$ так, чтобы быстрота откачки выбранного насоса была равна или превышала расчетную быстроту откачки.

После выбора насоса следует скорректировать размеры вакуумпроводов с учетом размеров впускного патрубка насоса. Обычно размер вакуумпровода выбирают равным диаметру впускного патрубка насоса. Поэтому, если первоначально выбранный диаметр трубопровода оказался меньше диаметра впускного патрубка типового насоса с быстротой откачки, большей или равной расчетной, следует диаметр трубопровода увеличить. При этом соответственно применяют и больших размеров арматуру. Далее вновь рассчитывают проводимости присоединительной коммуникации и определяют необходимую величину $S_н$, а затем снова выбирают насос уже с несколько меньшей быстротой откачки. После этого опять корректируют размеры присоединительной коммуникации и т. д.

Путем таких прикидочных расчетов выбирают размеры присоединительной арматуры и основного насоса, обеспечивающие заданную быстроту откачки системы $S_э$. Обычно конструируют систему на значение $S_э$, больше расчетного на 20—30 %.

7. Определяют быстроту откачки вспомогательного насоса по формуле

$$S_{всп} \geqslant G/p_{нв},$$

где G —максимальная производительность высоковакуумного насоса, равная произведению его быстроты откачки на максимальную величину впускного давления; $p_{нв}$ — наибольшее выпускное давление высоковакуумного насоса.

Далее, учитывая проводимость выбранных коммуникаций между основным и вспомогательным насосами, окончательно рассчитывают быстроту откачки вспомогательного насоса и определяют тип насоса. Размеры трубопроводов, соединяющих насосы, выбирают в зависимости от минимально возможного расстояния между ними и от диаметра всасывающего патрубка насоса предварительного разряжения.

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ

Рассчитать вакуумную систему, выбрать диаметры высоко- и низковакуумной линии вакуумпровода и диффузионный и механический насосы. Давление в рабочей камере ($P_р$) не более $2 \cdot 10^{-3}$ Н/м²; длина высоковакуумной линии $l_1 = 0{,}5$ м, низковакуумной $l_2 = 1$ м.

Рабочая камера диаметром $D = 0{,}5$ м и высотой $H = 0{,}75$ м выполнена из коррозионно-стойкой стали.

Технологическое газоотделение $Q_т$ составляет $2 \cdot 10^{-5}$ м³Н/(с×м²), натекание — $5 \cdot 10^{-5}$ м³Н/(с·м²).

1. Внутренняя поверхность рабочей камеры

$$F = \pi DH = 3{,}14 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}75 = 1{,}18 \text{ м}^2.$$

2. Газоотделение от внутренней поверхности рабочей камеры при удельном газоотделении $q_п = 16{,}6 \cdot 10^{-10}$ м³/м²

$$Q_т = 1{,}01 \cdot 10^5 q_п F = 1{,}01 \cdot 10^5 \cdot 16{,}6 \cdot 10^{-10} \cdot 1{,}18 = 1{,}98 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Н/(с} \cdot \text{м}^2).$$

3. Общий газовый поток

$$Q = 1{,}98 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} = 2{,}68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Н/(с} \cdot \text{м}^2).$$

4. Скорость откачки рабочей камеры

$$S = \frac{Q}{P_р} = \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} = 0{,}134 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. Скорость откачки диффузионного насоса

$$S_р < S_н \leqslant (2{,}5 \div 1{,}7) S_р = 0{,}3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выбираем насос Н-5С со следующими характеристиками:

Средняя быстрота действия, м³/с	0,5
Предельный вакуум, Н/м²	$4 \cdot 10^{-4}$
Максимальное выпускное давление, Н/м²	10
Мощность электронагревателя, кВт	1,0
Количество масла, заливаемого в насос, л	0,5
Диаметр патрубка, мм:	
впускного	160
выпускного	30

6. Выбираем диаметр высоковакуумной линии по диаметру впускного патрубка насоса $d_1 = 0{,}16$ м, тогда

$$\overline{P}_d = \frac{P_р d}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0{,}16 = 0{,}16 \cdot 10^{-3} < 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2}.$$

Следовательно, режим течения газа молекулярный.

7. Пропускная способность диафрагмы на выходе газа из рабочей камеры в вакуумпровод

$$U_д = 91 d_1^2 = 91 \cdot 0{,}16^2 = 2{,}33 \text{ м}^3/\text{с}.$$

8. Пропускная способность вакуумпровода длиной l_1 в молекулярном режиме

$$U_м = 121 \frac{d_1^3}{l_1 + n\,1{,}33 d_1} = 121 \frac{0{,}16^3}{0{,}5 + 2 \cdot 1{,}33 \cdot 0{,}16} = 0{,}535 \text{ м}^3/\text{с}.$$

9. Общая пропускная способность высоковакуумной линии

$$U = \frac{U_д U_м}{U_д + U_м} = \frac{2{,}33 \cdot 0{,}535}{2{,}33 + 0{,}535} = 0{,}435 \text{ м}^3/\text{с}.$$

10. Действительная скорость откачки рабочей камеры

$$S_р = \frac{U S_н}{U + S_н} = \frac{0{,}435 \cdot 0{,}5}{0{,}435 + 0{,}5} = 0{,}233 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$S_р' = 0{,}233 > S_р = 0{,}132;$$

$$S_р' = 0{,}233 > 0{,}4 S_н = 0{,}2.$$

Следовательно, выбранный диффузионный насос удовлетворяет всем требованиям.

11. Давление в рабочей камере

$$P'_{\text{р}} = \frac{Q}{S'_{\text{р}}} = \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{0{,}233} = 1{,}15 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2 < 2 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2.$$

12. Перепад давлений в высоковакуумной линии

$$\Delta P = \frac{Q}{U} = \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{0{,}435} = 0{,}616 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2.$$

13. Давление на входе диффузионного насоса

$$P_{\text{н}} = P'_{\text{р}} - \Delta P = 1{,}15 \cdot 10^{-3} - 0{,}616 \cdot 10^{-3} = 0{,}534 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2.$$

14. Проверка режима течения газа в высоковакуумной линии:

$$\bar{P}' d_1 = \frac{P'_{\text{р}} + P}{2} d_1 = \frac{1{,}15 \cdot 10^{-3} + 0{,}534 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 0{,}16 = 0{,}135 \cdot 10^{-3}.$$

Режим течения газа — молекулярный.

15. Минимальная скорость откачки механического насоса

$$S_{\min} = 1{,}5 \frac{Q}{P_{\text{пр}}} = 1{,}5 \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{10} = 4{,}02 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выбираем механический насос ВН-494 со следующими характеристиками:

Быстрота действия в интервале давлений $1 \cdot 10^5$—$1 \cdot 10^2$ Н/м², м³/с . .	$2{,}1 \cdot 10^{-4}$
Быстрота действия при давлении 1 Н/м², м³/с	$5 \cdot 10^{-5}$
Предельный вакуум, Н/м²	0,1
Мощность электродвигателя, кВт	0,6

16. Выбираем диаметр низковакуумной линии 30 мм (по диаметру впускного патрубка молекулярного насоса), тогда

$$\bar{P} d_2 = \frac{P_{\text{пр}} d_2}{2} = \frac{10}{2} \cdot 0{,}03 = 0{,}15 \text{ м} \cdot \text{Н/м}^2;$$

$$4 \cdot 10^{-3} < 0{,}15 < 1{,}7.$$

Следовательно, режим течения газа — молекулярно-вязкостный.

17. Пропускная способность низковакуумной линии в молекулярном режиме

$$U_{\text{м}} = 121 \frac{d_2^3}{l_2 + n \cdot 1{,}33 d_2} = 121 \frac{0{,}03^3}{1 + 1{,}33 \cdot 0{,}03} = 3{,}14 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

18. Пропускная способность низковакуумной линии в вязкостном режиме

$$U_{\text{в}} = 1{,}35 \cdot 10^3 \frac{d_2^4}{l_2} \bar{P} = 1{,}35 \cdot 10^3 \frac{0{,}03^4}{1} \cdot 5 = 5{,}46 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

19. Пропускная способность низковакуумной линии в молекулярно-вязкостном режиме

$$U_{м.в} = U_м + U_в = 3{,}14 \cdot 10^{-3} + 5{,}46 \cdot 10^{-3} = 8{,}6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

20. Скорость откачки на выходном патрубке диффузионного насоса при давлении на входном патрубке механического насоса $P_н = 1$ Н/м²

$$S_{min} = \frac{U_{м.в} S_н}{U_{м.в} + S_н} = \frac{8{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-5}}{8{,}6 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-5}} = 4{,}97 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$S_{min} > 0{,}9 S_н.$$

21. Давление на выпускном патрубке диффузионного насоса

$$P_{вып} = \frac{Q}{S_{min}} = \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{4{,}97 \cdot 10^{-5}} = 5{,}4 \text{ Н/м}^2 < 10 \text{ Н/м}^2.$$

22. Проверка режима течения газа в низковакуумной линии:

$$\bar{P} d_2 = \frac{P_н + P'_{вып}}{2} d_2 = \frac{1 + 5{,}4}{2} 0{,}03 = 0{,}09 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Режим течения газа — молекулярно-вязкостный.

23. Объем рабочей камеры

$$V = \frac{\pi D^2}{4} H = 0{,}78 \cdot 0{,}5^2 \cdot 0{,}75 = 0{,}147 \text{ м}^3.$$

24. Ориентировочное время откачки рабочей камеры до 100 Н/м²

$$t = 8 \frac{V}{S_н} = 8 \frac{0{,}147}{0{,}21 \cdot 10^{-3}} = 5600 \text{ с} = 93 \text{ мин}.$$

25. Так как время откачки велико, заменяем насос ВН-494 насосом РВН-20 со следующими характеристиками:

Быстрота действия при давлении $1{,}01 \cdot 10^{-5}$ Н/м², м³/с	$2{,}7 \cdot 10^{-3}$
Быстрота действия при давлении 130 Н/м², м³/с	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$
Быстрота действия при давлении 1 Н/м², м³/с	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$
Предельный вакуум, Н/м²	0,1
Мощность электродвигателя, кВт	0,8

В этом случае ориентировочное время откачки

$$t = 8 \frac{V}{S_н} = \frac{0{,}147}{2{,}7 \cdot 10^{-3}} = 436 \text{ с} = 7{,}3 \text{ мин}.$$

26. Скорость откачки на выходном патрубке диффузионного насоса при давлении на входном патрубке механического насоса 1 Н/м²

$$S^*_{min} = \frac{U_{м.в} S_н}{U_{м.в} + S_н} = \frac{8{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{8{,}6 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-4}} = 4{,}72 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$S^*_{min} > 0{,}9 S_н.$$

Насос РВН-20 обеспечивает нормальную работу диффузионного насоса.

27. Давление на выпускном патрубке диффузионного насоса

$$P^*_{\text{вып}} = \frac{Q}{S^*_{\min}} = \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{4{,}72 \cdot 10^{-4}} = 0{,}56 \text{ Н/м}^2.$$

28. Проверка режима течения газа в низковакуумной линии:

$$\bar{P}d_2 = \frac{P_{\text{н}} + P^*_{\text{вып}}}{2} d_2 = \frac{1 + 0{,}56}{2} 0{,}03 = 0{,}023 \text{ Н/м}^2.$$

Режим течения газа — молекулярно-вязкостный.

29. Время откачки механическим насосом до давления $1 \cdot 10^2$ Н/м^2 при быстроте действия $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ м^3/с

$$t_1 = \frac{V}{S_{\text{н}} - \frac{Q}{P} \ln \frac{P_{n+1}}{P_n}} \ln \frac{P_{n+1}}{P_n} =$$

$$= \frac{0{,}147}{2{,}4 \cdot 10^{-3} - \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^2}} \ln \frac{1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^2} = 420 \text{ с} = 7 \text{ мин}.$$

30. Время откачки механическим насосом до давления 1 Н/м^2 (принимаем быстроту действия насоса в интервале давлений 100—1 Н/м^2 постоянной и равной $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м^3/с)

$$t_2 = \frac{V}{S_{\text{н}} - \frac{Q}{P} \ln \frac{P_{n+1}}{P_n}} \ln \frac{P_{n+1}}{P_n} =$$

$$= \frac{0{,}147}{0{,}5 \cdot 10^{-3} - \frac{2{,}68 \cdot 10^{-4}}{50} \ln \frac{100}{1}} \ln \frac{100}{1} = 1354 \text{ с} = 23 \text{ мин}.$$

31. Общее время откачки системы от атмосферного давления до 1 Н/м^2 составляет 30 мин.

ГЛАВА 4

ГАЗОВЫЕ СИСТЕМЫ ОБОРУДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Газовая система установки полупроводникового производства выполняет следующие функции: очистку, смешение, распределение, транспортирование, измерение и регулирование параметров газов и парогазовой смеси, а также утилизацию и нейтрализацию выводимых из реактора продуктов реакции. Для осуществления перечисленных функций газовые системы должны иметь соответствующее оборудование (табл. 7).

Таблица 7. **Оборудование газовых систем полупроводникового производства**

Аппаратура газовых систем и ее назначение					
Очистка газов	Приготовление парогазовой смеси (ПГС)	Распределение и регулирование параметров газов	Изменение параметров газов	Автоматизация газораспределения и управления параметрами газов	Утилизация и нейтрализация вторичных газов
Фильтры механические и электростатические. Фильтры сорбционные. Установки для сорбционной осушки. Установки для диффузионной очистки и осушки	Дозаторы барботажные. Дозаторы поверхностного испарения. Дозаторы диффузионные. Дозаторы капельные. Смесители. Устройства ввода ПГС	Регуляторы давления. Стабилизаторы давления. Стабилизаторы расходов. Запорные краны и вентили. Регулирующие вентили. Натекатели. Электромагнитные клапаны	Манометры механические и жидкостные. Ротаметры. Счетчики расхода. Расходомеры кулориметрические и анемометрические. Измерители концентраций. Газоанализаторы	Программаторы командно-временные. Программаторы расходов концентраций, температур. Преобразователи: расходов, давлений, концентраций, температур, мощностей	Регенераторы. Гидрозатворы и свечи. Скрубберы

Газовые системы можно классифицировать по следующим основным признакам:

по технологическому назначению: для эпитаксиальных, окислительных, диффузионных и других процессов;

по агрегатному состоянию реагентов: с твердыми, жидкими или газообразными реагентами;

по степени автоматизации: с ручным управлением; с автоматизированным управлением, в том числе программным;

по конструктивному исполнению: в виде отдельных, функционально законченных блоков; в виде конструктивных модулей, встроенных в оборудование.

Газовые системы должны отвечать следующим технологическим требованиям:

1. Газовые системы должны быть герметичными. Конструкция и монтаж должны исключать проникновение в систему воздуха и влаги из окружающей среды, а из системы в окружающую среду — реакционных газов, в особенности токсичных и взрывоопасных.

2. Материалы газовых систем не должны вносить загрязнений и примесей в вещества, используемые в процессах, и вступать с ними в реакцию.

3. Конструкции систем должны обеспечивать всесторонний доступ к аппаратуре, трубопроводам и разъемам для периодического осмотра, испытаний на плотность, регулярного демонтажа для очистки.

4. Конструкции систем не должны содержать непродуваемых участков и застойных зон, в которых могли бы скапливаться реагенты и отходы реакций, вносящие неконтролируемые примеси в парогазовую смесь.

5. Высокая точность измерения и регулирования расходов газа.

6. Минимальные гидравлические сопротивления при достаточных пропускных способностях отдельных участков газовой системы.

7. Безопасные условия эксплуатации при нормальной работе и защиту в аварийных режимах.

На стадии разработки принципиальной схемы газовой системы необходимо выбрать и рассчитать аппаратуру системы, соединяющую трубопроводы, а также определить последовательность работы всей аппаратуры в основных и вспомогательных технологических и аварийных режимах. Состав аппаратуры в каналах определяется их назначением, однако обычно каналы содержат запорные устройства, регуляторы давлений, фильтры и измерительную аппаратуру.

2. АППАРАТУРА И ЭЛЕМЕНТЫ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Аппаратура для приготовления парогазовой смеси. Разработку газовых схем рекомендуется начать с определения источников подачи газообразных компонентов в парогазовую смесь. Для жидких соединений источниками служат термостатированные дозаторы или увлажнители. Расходы жидких соединений могут колебаться в широких пределах в соответствии со скоростью осаждения слоев, которая изменяется от $0{,}1 \cdot 10^{-3}$ до $20 \cdot 10^{-3}$ мкм/с.

В эпитаксиальных процессах расходы основного реагента составляют $(15—30) \cdot 10^{-6}$ кг/с, а при проведении процессов диффузии $(0{,}03—0{,}3) \cdot 10^{-6}$ кг/с. Отклонения точности дозирования в ± 5 % составляют для эпитаксиальных процессов $\pm (0{,}75—1{,}5) \cdot 10^{-6}$ кг/с, для диффузионных $\pm (0{,}0015—0{,}015) \cdot 10^{-6}$ кг/с. Практически невозможно создать такую универсальную конструк-

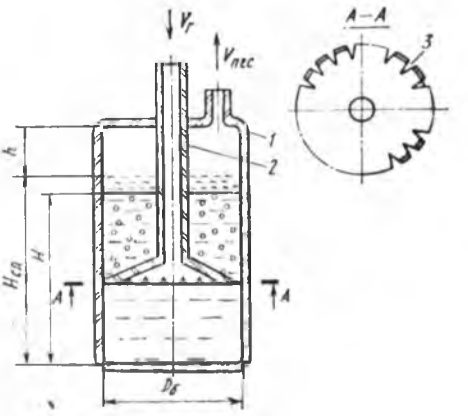


Рис. 33. Схема дозатора барботажного типа:
1 — сосуд; *2* — распределитель; *3* — прорези

цию дозирующего устройства, которая удовлетворяла бы требованиям всех технологических процессов.

В настоящее время существует большое число типов испарителей и дозаторов, различающихся принципами работы, производительностью, точностью дозирования, конструктивным исполнением.

В современных промышленных установках для наращивания эпитаксиальных слоев кремния нашли применение дозаторы барботажного типа (барботеры). Эти дозаторы просты по конструкции, производительны и надежны в работе. Схема дозатора барботажного типа показана на рис. 33.

Газ-носитель, подаваемый со скоростью $V_г$, проходя через слой жидкости толщиной H, создает сложную газожидкостную систему толщиной H, состоящую из пузырьков или струй газа и циркулирующих токов жидкости. В свободном пространстве барботера высотой h образуется парогазовая смесь, которая выходит из барботера со скоростью $V_{пгс}$.

Концентрация пара на выходе из барботера зависит от многих факторов: уровня реагента, скорости потока газа-носителя, диаметра пузырьков газа, объема дозатора, объема парового пространства и т. д.

Стабилизация концентрации отдельных компонентов парогазовой смеси (ПГС) может быть достигнута за счет охлаждения ПГС, выходящей из барботера. При достаточном охлаждении наступает конденсация паров реагентов; в этом случае концентрация компонентов определяется температурой конденсации и может быть найдена по зависимости давления насыщенного пара каждого компонента от температуры насыщения. Такой способ стабилизации устраняет зависимость концентраций от уровня реагента и расхода газа-носителя в широких диапазонах их изменения. Применение барботажного испарителя позволяет сохранить постоянство испаряемого вещества. Так, например, в испарителе диаметром 100 мм при температуре 15 °С полное насыщение водорода парами $SiCl_4$ при газовых потоках менее 100 л/ч достигается при барботаже водорода через слой более 50 мм. Из этих же соображений выбирают размеры камеры испарителя с отношением высоты к диаметру ~ 10.

В стационарном режиме работы количество паров $SiCl_4$, уносимых газовым потоком из испарителя при условии полного насы-

щения и без учета уноса капель в виде тумана, может быть определено по формуле

$$П_{SiCl_4} = p_{SiCl_4} V_{н_2} / (p_{\Sigma} - p_{SiCl_4}),$$

где $V_{н_2}$ — поток газа через испаритель; p_{SiCl_4} — равновесное давление паров $SiCl_4$ при температуре испарителя; p_{Σ} — общее давление в системе.

При испарении многокомпонентных смесей применяют подпитку испарителя. Недостаток барботажного испарителя — наличие тумана над поверхностью испарения, что может привести к неконтролируемому попаданию жидкости в магистрали. При испарении жидкости с поверхности этот недостаток может быть устранен.

Принцип работы дозаторов с зеркалом испарения основан на испарении диффузанта с поверхности в поток газоносителя, движущегося вдоль этой поверхности. Схемы дозаторов с зеркалом испарения показаны на рис. 34. В зависимости от скорости газа и устройства дозатора перенос массы испаряемого вещества в поток газа может иметь конвективно-диффузионный (рис. 34, *а* и *б*) и чисто диффузионный механизмы (рис. 34, *в*). Для дозаторов с конвективно-диффузионным характером переноса величина дозы испаряемого реагента зависит от формы и размеров поверхности испарения, расхода и характера движения газоносителя уровня диффузанта, его физических свойств и др. Такая многофакторная зависимость ограничивает применение этих простых по конструкции и в эксплуатации дозаторов, например, в автоматизированных системах управления диффузионными процессами.

В дозаторе на рис. 34, *в* питание зеркала испарения осуществляется принудительно по тонкой трубке или пористому стержню за счет капиллярных сил. Нагреватель позволяет регулировать парциальное давление испаряемого диффузанта в ПГС. Недостатком метода испарения с поверхности является зависимость коэф-

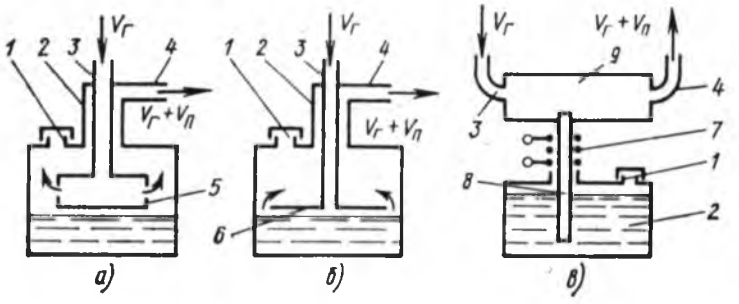


Рис. 34. Схема дозаторов с зеркалом испарения:

а — с коллектором распределения газоносителя; *б* — с направляющим зонтом; *в* — с капиллярно-пористой трубкой; $V_г$ — скорость газоносителя; $V_г + V_п$ — скорость парогазовой смеси;

1 — отверстие для заливки диффузанта; *2* — сосуд; *3* — трубка ввода газоносителя; *4* — трубка вывода ПГС; *5* — коллектор; *6* — зонт; *7* — нагреватель; *8* — капиллярная трубка или пористый стержень; *9* — смеситель

фициента массопередачи от скорости потока газа. Изменение температуры газа-носителя на ±1 % приводит к погрешности 0,3 %. Отклонение расхода газа-носителя на ±5 % дает ошибку ±1,5—3 % в зависимости от конструкции дозатора. Из описанного следует, что погрешность дозирования в наибольшей степени зависит от изменения температуры диффузанта. Именно этот параметр должен быть выбран как управляемый при создании дозаторов для автоматической системы управления рабочей концентрацией ПГС.

Испарители дозирующего типа основаны на периодическом отборе и испарении определенного количества жидкости. Введение дозирующего вещества в струю газа-разбавителя, например, с помощью микрошприца, позволяет получать парогазовые смеси в широком диапазоне концентраций. К преимуществам подобных дозирующих систем относятся их сравнительная универсальность, широкий диапазон концентраций разнообразных веществ, малая зависимость от внешних условий; значительным недостатком является прерывистость действия.

Большинство процессов окисления осуществляется в потоках водяного пара или увлажненных газов (аргона, кислорода). Наиболее стабильного увлажнения можно достигнуть в увлажнителе, показанном на рис. 35. Нагреватель *7* представляет собой нихромовую спираль, помещенную в кварцевую трубку, и погружен непосредственно в воду. Датчиком температуры является термометр сопротивления *4*. Чехлом термометра служит тонкостенная нике-

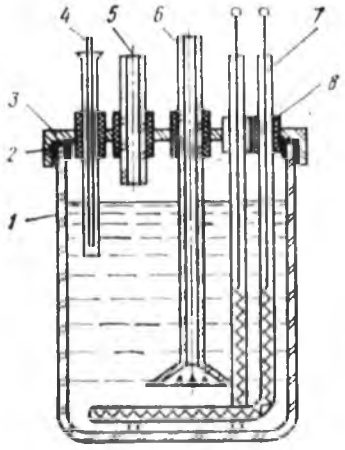


Рис. 35. Схема увлажнителя:
1 — сосуд; *2* — уплотнение; *3* — крышка; *4* — термометр сопротивления; *5* — вывод парогазовой смеси; *6* — распределитель; *7* — нагреватель; *8* — уплотнение

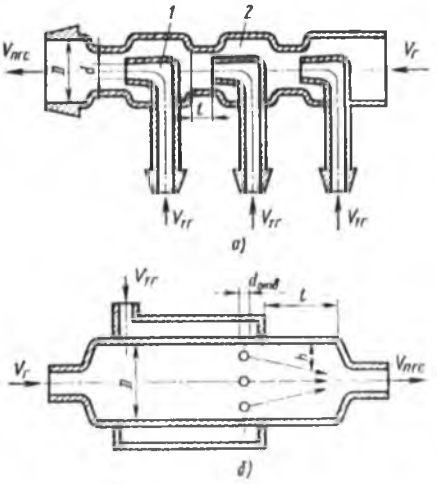


Рис. 36. Схемы смесителей:
а — с соплами ввода примесей; *б* — с камерой ввода примесей; $V_г$ — скорость газа-разбавителя, $V_{тг}$ — скорость подачи технологических газов; $V_{пгс}$ — скорость парогазовой смеси.

левая трубка, на внешнюю поверхность которой нанесен напылением тонкий сплошной слой фторопласта. Точность регулировки температуры ± 3 °С, что соответствует поддержанию давления паров воды в пределах ± 665 Па.

Смесители. Для смешения и гомогенизации парогазовой смеси широкое распространение получили струйные смесители. Схемы смесителей показаны на рис. 36, *а*, *б*. Смешение компонентов начинается в узких соплах *1* и заканчивается в камерах *2* смесителя. Для быстрого и тщательного перемешивания скорость $V_г$ газа-разбавителя устанавливается в 2—3 раза выше скорости технологических газов. Для смешения потоков, имеющих малую кинетическую энергию, рекомендуется смеситель, схема которого изображена на рис. 36, *б*. Диаметр отверстий $d_{отв}$ для струи и технологического газа выбирают из условий $nd^2_{отв} \leqslant D^2$, где n — число отверстий для выхода технологического газа; D — диаметр камеры смешения, м.

Длину зоны смешения h выбирают из соотношения

$$h/(D/2) \geqslant 0{,}3.$$

В некоторых технологических установках роль смесителя может выполнять часть реактора. Это определяется устройством ввода парогазовой смеси в реактор и конструкцией реактора.

Запорно-регулирующая аппаратура (арматура). Запорную арматуру устанавливают на входе каждого канала, а также на трубопроводах с часто отсоединяемой аппаратурой, например дозаторами. В качестве входной запорной арматуры лучше использовать краны с ручным управлением, имеющие большую надежность и минимальное время закрытия, что важно для работы со взрывоопасными и вредными веществами.

В автоматизированных системах для управления газовыми потоками применяют запорные клапаны с электрическими или пневматическими приводами, которые устанавливают на концах линий перед их входом в смеситель.

Регулирующую арматуру — вентили, натекатели устанавливают, как правило, после регуляторов давления. Для регулирования можно использовать и встроенную арматуру, например натекатели в ротаметрах. Если применены устройства автоматического регулирования расхода газов, то с целью повышения качества регулирования их исполнительные органы встраивают непосредственно перед датчиками расхода.

В газовых системах применяют разнообразные клапаны, вентили, дроссели, используемые для распределения газов по каналам. Эту аппаратуру в зависимости от газовых сред, в которых она применяется, подразделяют на две группы:

1) аппаратура, устанавливаемая на трубопроводах технических и продувочных газов: обеспыленного воздуха, азота, аргона, водорода. Это обычно стандартная аппаратура из коррозионно-стойкой стали с уплотняющими элементами из кислотостойких резин, фторопласта и др.;

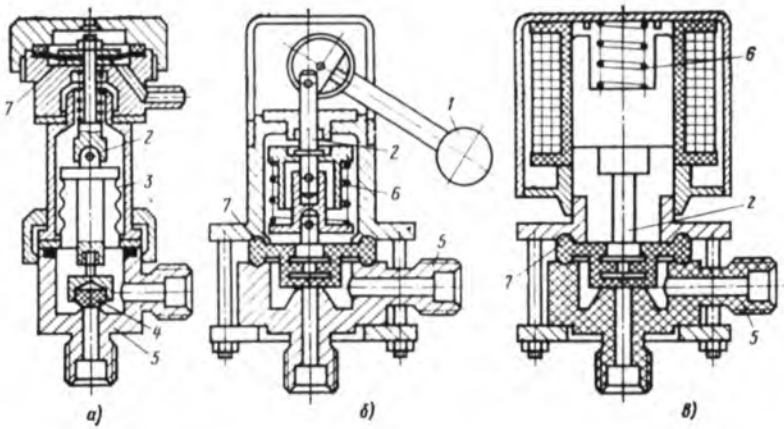


Рис. 37. Типовые конструкции клапанов:
а — с пневматическим управлением; *б* — с ручным управлением; *в* — с электромагнитным управлением;
1 — рукоятка; *2* — шток; *3* — сильфон; *4* — седло; *5* — корпус; *6* — пружина; *7* — мембрана

2) аппаратура, удовлетворяющая особым требованиям по герметичности и чистоте, устанавливаемая в линиях реакционных газов и чистого водорода, а также в линиях ПГС, содержащих пары жидких диффузантов.

Все металлические элементы этих конструкций выполнены из коррозионно-стойких сталей, а в аппаратуре, проводящей ПГС, — из фторопласта. В качестве материала для уплотнителей чаще всего используют резину марки ИРП-1225 в виде мембраны или седел. Конструкции выполнены с учетом необходимости продувки внутренних объемов, минимальных контактных поверхностей с ПГС, простоты очистки и сборки.

Типовые конструкции клапанов показаны на рис. 37.

Качественное проведение процессов требует стабилизации параметров. Регулятор давления (рис. 38) обеспечивает поддержание заданного давления в канале или на входе в регулятор расхода за счет дросселирования потока газа. Чувствительный элемент регулятора давления — мембрана, воспринимающая усилия, развиваемые задатчиком и давлением газа. При изменении давления мембрана деформируется и перемещает дроссельный регулирующий орган, который изменя-

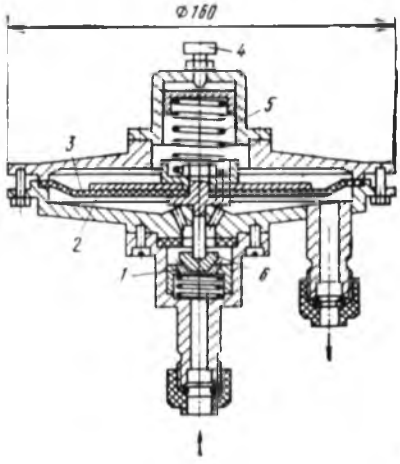


Рис. 38. Схема регулятора давления

ет поток газа в камеру регулятора. Давление газа за регулятором устанавливают с помощью винта *4*, воздействующего на пружину *5*. Усилие пружины уравновешивается давлением газа на мембрану *3* в полости *2*. При изменении давления газа в сети клапан *6*, связанный с мембраной, перемещается, при этом изменяется проходное сечение отверстий *1* до наступления нового положения равновесия. Этот регулятор работает при давлении газа на входе 0,15—0,4 МПа и обеспечивает на выходе давление до 0,4 МПа с точностью 5 %. Корпус и детали регулятора выполнены из коррозионно-стойкой стали, а мембрана — из резины ИРП-1225.

Регуляторы расхода предназначены для поддержания постоянного во времени объемного или массового расхода газов. Необходимость стабилизации расходов связана с возможными изменениями гидравлических сопротивлений каналов газовой системы (перегибы трубопроводов, перекрытие запорных органов, неплотность в разъемах и др.).

При установившемся равномерном движении объемный расход газа Q, проходящего через сечение S (м²), определяют по формуле

$$Q = \mu S \omega_{ср},$$

где $\omega_{ср}$ — фактическая средняя скорость в этом сечении, м/с; μ — коэффициент расхода, отражающий неравномерность скорости по сечению потока.

При малых перепадах давления средняя скорость газа

$$\omega_{ср} = \sqrt{(2g/\rho)\,\Delta p},$$

где Δp — перепад давлений на исполнительном органе регулирующего устройства, МПа; ρ — плотность газа, кг/м³.

Непрерывное регулирование расхода газа обычно достигается (при прочих равных условиях) изменением проходного сечения исполнительного органа или перепада давления на нем. В системах регулирования и стабилизации расходов газов применяют тепловые расходомеры, принцип действия которых основан на измерении тепловой мощности, рассеиваемой нагретым телом и зависящей от скорости или массового расхода газа, в потоке которого находится это тело.

На рис. 39 показана конструкция регулятора расхода газа и схема его включения. Основная часть расхода газа проходит через трубку *5*, в которой установлена диафрагма *6* с калиброванным отверстием. Часть газа проходит через тонкостенную никелевую трубку *1*, на которую намотаны обмотки *2* и *3* из медного провода, подключенные к источнику стабилизированного постоянного напряжения 24 В. Под действием потока газа обмотка *2* охлаждается, а температура обмотки *3* понижается в меньшей степени. Обмотки ведут себя как термосопротивления, что вызывает в измерительной диагонали моста сигнал разбаланса, величина которого пропорциональна расходу газа. Для снижения теплового воздействия среды корпус *4* выполнен из материала с высокой

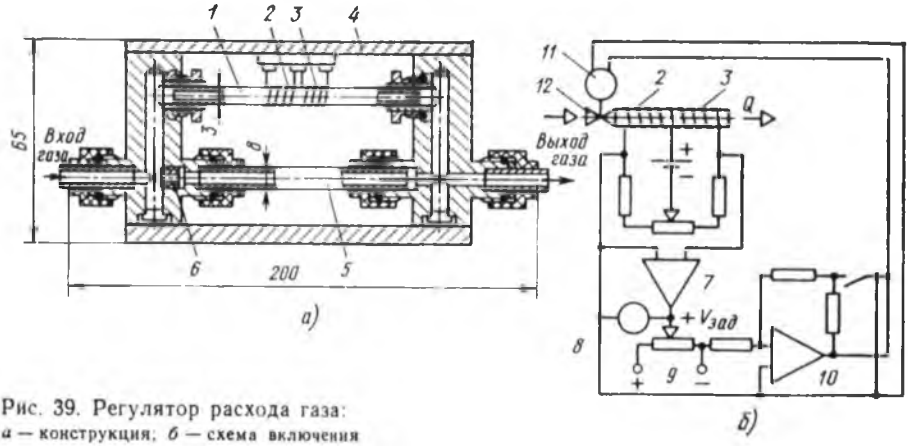


Рис. 39. Регулятор расхода газа:
а — конструкция; *б* — схема включения

удельной теплоемкостью. Сигнал разбаланса усиливается (рис. 39, *б*) и подается на стрелочный индикатор *8* расхода газа и на задатчик *9* величины расхода газа.

Разность между заданным ($V_{зад}$) и фактическим (V) значениями усиливается усилителями *7*, *10* и подается на электродвигатель *11*, который изменяет проходное сечение вентиля *12* таким образом, чтобы довести расход газа Q до заданного значения. Описанный преобразователь расхода обеспечивает при диаметре отверстия диафрагмы $1 \cdot 10^{-3}$ м верхний предел измерений по водороду $3 \cdot 10^{-6}$ м³/с, а при диаметре отверстий $3 \cdot 10^{-3}$ и $6 \cdot 10^{-3}$ м — соответственно $1 \cdot 10^{-6}$ и $25 \cdot 10^{-6}$ м³/с.

Приборы для измерения расхода газов. В газовых системах оборудования полупроводникового производства используют расходомеры постоянного перепада давления: ротаметры и в отдельных случаях U-образные манометры.

Принцип действия ротаметров состоит в том, что подвижный элемент (поплавок), помещенный в цилиндрическую трубку из стекла, воспринимает динамическое давление обтекающего его потока газа и перемещается в зависимости от величины расхода газа. К достоинствам ротаметров относятся: большой диапазон измерений, малые потери давлений, допустимость применения в некоторых агрессивных средах.

Ротаметр типа РМ-0,04 ГУЗ имеет верхний предел измерений по воздуху 0,04 м³/ч, условный проход 3 мм, габаритные размеры 280×24×24 мм и поплавок из полистирола, а ротаметр типа РМ-2,5 ГУЗ — верхний предел измерения по воздуху 2,5 м³/ч, условный проход 15 мм, габаритные размеры 455×95×95 мм и поплавок из эбонита.

Недостаток всех ротаметров — непригодность их в системах регулирования и стабилизации расходов газа. В таких системах применяются специальные расходомеры, в том числе тепловые.

Принцип действия тепловых расходомеров основан на измерении тепловой мощности, рассеиваемой нагретым током и зависящей от скорости или массового расхода газа, в потоке которого находится это тело. Достоинствами тепловых расходомеров являются дистанционность измерения, измерения с малыми погрешностями при любых расходах и давлениях, отсутствие движущихся частей. Тепловые расходомеры сложны по конструкции и пока серийно промышленностью не выпускаются.

Трубопроводы и соединения. Поверхность трубопроводов составляет бо́льшую часть всей поверхности газовых систем, контактирующей с газами. В качестве материалов трубопроводов используются коррозионно-стойкие стали, фторопласт-4, кварцевое стекло и полиэтилен. Применение медных трубопроводов нежелательно из-за трудности очистки их от примесей. Металлические трубопроводы, удовлетворяющие требованиям плотности и прочности, обеспечивают надежную герметизацию соединений, удобны в монтаже и эксплуатации. Их изготавливают из бесшовных стальных труб. Участки трубопроводов, транспортирующие пары жидких реагентов (PCl_3, BBr_3, PBr_3 и т. д.) от испарителей до вводов в реакторы, для обеспечения коррозионной стойкости выполняют из фторопластовых труб. Максимальная допустимая температура таких трубопроводов при эксплуатации +120 °С.

В целях экономии коррозионно-стойкой стали трубопроводы, проводящие чистые инертные газы и азот, можно изготавливать из полиэтилена. Для этого используют трубы напорные низкой плотности марки ПНП при максимальной температуре эксплуатации +80 °С. Трубопроводы из кварцевого стекла из-за хрупкости редко используют в конструкциях газовых систем промышленных установок и трудности подгонки стыковочных размеров при монтаже. В газовых системах лабораторных установок кварцевые трубопроводы часто используют ввиду их термостойкости, легкости очистки и прозрачности.

Трубопроводы малых диаметров обладают повышенным гидравлическим сопротивлением и в них высока скорость газов, что неблагоприятно влияет на равномерность их перемешивания. Но увеличение внутренних диаметров трубопроводов ведет к возрастанию площади поверхности, контактирующей с газами, т. е. к увеличению загрязнения газов и времени очистки трубопроводов при профилактических работах. Эти факторы с учетом существующих норм на герметичность и допустимое избыточное давление в трубопроводах, а также практика конструирования и эксплуатации газовых систем обусловили оптимальный выбор внутренних диаметров трубопроводов в пределах $(6—10)\cdot10^{-3}$ м. Одним из критериев при выборе диаметра трубопровода является скорость газа, выбираемая в пределах 15—25 м/с. Обогреваемые трубопроводы используют в тех случаях, когда необходимо предотвратить конденсацию паров реагентов на пути от источников до ввода в реактор. Температуру обогрева выбирают равной или несколько большей, чем температуру образования паров. Чаще используют

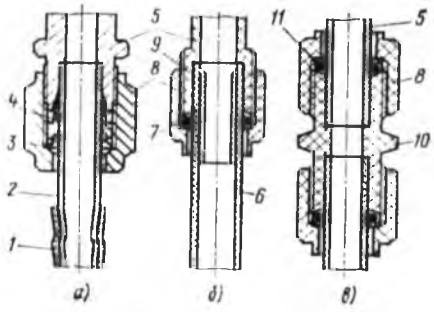


Рис. 40. Основные виды соединений:
а, б, в — соответственно металлического, фторопластового; кварцевого трубопроводов;
1 — трубка из полиэтилена; *2* — трубка (ниппель); *3* — кольцо упорное; *4* — кольцо уплотнительное; *5* — корпус; *6* — трубка из фторопласта; *7* — шайба из фторопласта; *8* — гайка; *9* — втулка распорная; *10* — переходник; *11* — кольцо из резины

для обогрева трубопроводов гибкие нагреватели из нихромовой проволоки — прямой или в виде спирали, вшитой в теплоизоляцию из кремнеземной ткани типа КТ-11Э; для сшивания применяют кремнеземную нить.

Питающее напряжение таких нагревателей почти всегда меньше стандартного, поэтому в схемах используют понижающие трансформаторы. Конструкции соединений трубопроводов с аппаратурой зависят от рабочих давлений и материалов реагентов, а также от материалов соединяемых элементов.

На рис. 40 показаны основные виды соединений трубопроводов, изготовленных из различных материалов. Для удобства эксплуатации (периодической чистки) все соединения выполняют разъемными. При использовании резьбовых соединений из коррозионно-стойкой стали на наружную резьбу рекомендуется накладывать фторопластовые прокладки, которые при затяжке действуют как уплотнитель. Усилие затяжки фторопластовых и кварцевых соединений контролируют.

3. КОНСТРУИРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Для конструирования газовой системы установки необходимо знать технологические и конструктивные параметры проводимого процесса: концентрации реагентов, расход парогазовой смеси, температуры в дозаторах и реакторе, физическое состояние, степень чистоты, условия поставки и хранения исходных материалов; конструкцию реактора, расположение в нем обрабатываемых изделий, организацию ввода и вывода парогазовой смеси.

Конструированию газовой системы предшествует разработка принципиальной схемы газовой системы, определяющей полный состав элементов и связей между ними. На стадии разработки принципиальной схемы нужно выбрать и при необходимости рассчитать аппаратуру и соединяющие трубопроводы, а также определить последовательность работы всей системы в основных и вспомогательных технологических и аварийных режимах.

Разработку схемы рекомендуется начать с определения источников подачи газообразных компонентов в парогазовую смесь.

Для жидких исходных веществ источниками служат термостатированные дозаторы или увлажнители.

Баллоны с газами входят в газовую систему, если они конструктивно размещаются рядом с установкой и обслуживаются оператором. В отношении техники безопасности и удобства обслуживания баллоны лучше размещать вне производственных помещений. В таких системах делаются вводы, соединенные с баллонами специальными трубопроводами. Однако для токсичных и взрывоопасных соединений такие трубопроводы могут стать источниками утечек этих веществ. Кроме того, длинные трубопроводы трудно чистить (продувать). Оптимальным решением является включение баллонов в газовые системы и размещение их рядом с оборудованием в специальных шкафах, имеющих вытяжную вентиляцию.

После определения всех источников и вводов газов, формируют функциональные каналы (линии) газовой системы. Каждый канал выполняет определенную функцию, например, для подачи в реактор газовых легирующих смесей при газовом легировании или для подачи в реактор чистого водорода и т. д.

Агрегатирование является одним из перспективных направлений развития оборудования полупроводникового производства, поэтому газовая система должна обеспечить параллельно-последовательную работу двух одинаковых реакторов.

Газовые системы, являющиеся частью технологического оборудования, обычно размещают в отдельных шкафах или встраивают в оборудование в виде секций и блоков. Выбор компоновки определяется различными факторами, сложностью системы, наличием каналов газовой системы и связей между ними, типами дозаторов и т. д.

При любой компоновке газовой системы на лицевой панели шкафа газораспределительной системы устанавливают: контрольно-измерительную аппаратуру (манометры, ротаметры, термометры, световые табло); запорную и регулирующую аппаратуру с ручным управлением (входные краны, вентили, регуляторы давлений и расхода и др.); органы дистанционного управления (кнопки, переключатели, задатчики, реле времени), табло сигнализации аварийных и рабочих режимов.

Во внутренних объемах газовых шкафов и модулей размещают аппаратуру периодического обслуживания (фильтры, стабилизаторы расходов и давлений, электромагнитные клапаны, датчики с дистанционным выходом), аппаратуру для приготовления ПГС (испарители, дозаторы, увлажнители, смесители) и все трубопроводы с соединительными элементами.

Внутри газового шкафа стремятся не располагать электроаппаратуру вследствие возможной коррозии контактов и электроизоляции агрессивными газами. Электрооборудование необходимо группировать в одном месте вне зоны действия вытяжной вентиляции, например в верхней части шкафа. При конструировании трубопроводов соблюдают следующие условия: весь монтаж дол-

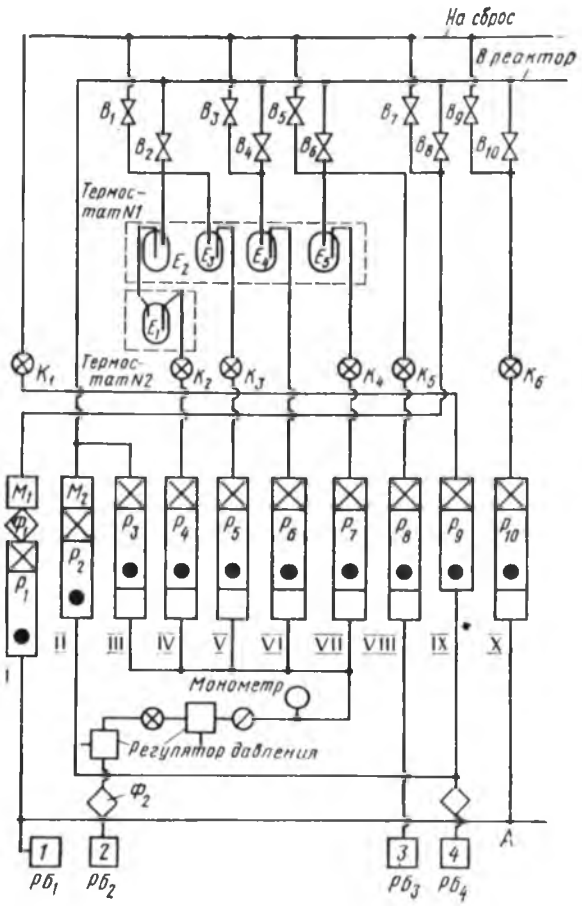


Рис. 41. Схема газораспределительной системы для проведения процесса газовой эпитаксии:

I—X — линии газораспределительной системы; M_{1-9} — регулировочный игольчатый узел; B_{1-10} — мембранные газовые фторопластовые вентили; K_{1-6} — вентили с кварцевым корпусом; P_{1-10} — ротаметры; $РБ_{1-4}$ — редукторы на баллонах; $Ф_{1-2}$ — фильтры

жен иметь минимальную протяженность и быть удобным для обслуживания; трубопроводы можно разводить в любом направлении; нельзя применять труднопродуваемые U-образные колена; изгибы трубопроводов надо выполнять большими радиусами для снижения гидравлических потерь; тяжелые трубопроводы нужно подвешивать или устанавливать на опоры, разгружая соединения; нежелательно применять сильфонные и другие гибкие компенсаторы, имеющие негладкие внутренние поверхности.

Рассмотрим газораспределительную систему для проведения процесса газовой эпитаксии, состоящую из 10 каналов регулируемой подачи различных газов. На рис. 41 показана схема такой газораспределительной системы. Газы, проходящие по этим линиям, могут подаваться в реактор или в трубопровод на сброс, постоянно продуваемый инертным газом по линии *I*.

По линии *II* подается очищенный инертный газ (азот, гелий, аргон) для продувки реактора перед началом и по окончании процесса роста.

Линия *III* служит для подачи в реактор чистого водорода. Управление работой магнитных вентилей M_1 и M_2 устроено таким образом, что при открывании одного вентиля другой автоматически закрывается.

На линии *IV* установлены два испарителя $SiCl_4$, основной и компенсирующий. На линии *V* установлен испаритель $SiCl_4$ для легирования эпитаксиальных слоев донорными или акцепторными примесями.

В испаритель линии *VI* заливают тетрахлорид углерода, используемый для нанесения на нагреватель слоя карбида кремния при совместной подаче в реактор $SiCl_4$ и CCl_4.

Испаритель линии *VII* резервный.

Все испарители установлены в термостатах. При этом температура основного испарителя линии *IV* регулируется с точностью $+0{,}5\,^{\circ}C$ в пределах 0—25 °С, а температура остальных испарителей — в пределах 0—50 °С.

Линию *VIII* используют при газовом легировании. Она служит для подачи в реактор газовых легирующих смесей, содержащих диборан, фосфор, арсин. Линия *IX* предназначена для подачи в реактор газообразного хлористого водорода.

Линия *X* — резервная.

На всех линиях установлены ротаметры, снабженные игольчатыми регуляторами расхода газа. Магнитные вентили подключены к программному устройству и могут работать автоматически по заранее заданной программе. Манометр служит для проверки газораспределительной системы на герметичность под давлением.

ГЛАВА 5

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Классификацию кристаллизационных процессов выращивания монокристаллов полупроводников можно проиллюстрировать с помощью рис. 42.

Кристаллизацию расплава, при которой тепло отводится от фронта кристаллизации преимущественно в одном направлении, называют направленной. К методам направленной кристаллизации, характеризуемым наличием в системе одной фазовой границы (фронта кристаллизации) и постоянным убыванием объема расплава в ходе процесса, относят методы Бриджмена и Чохральского (рис. 42, *а* — *г*), а направленную кристаллизацию, характеризуемую наличием в системе двух фазовых границ (фронта плавления и фронта кристаллизации) и постоянным объемом распла-

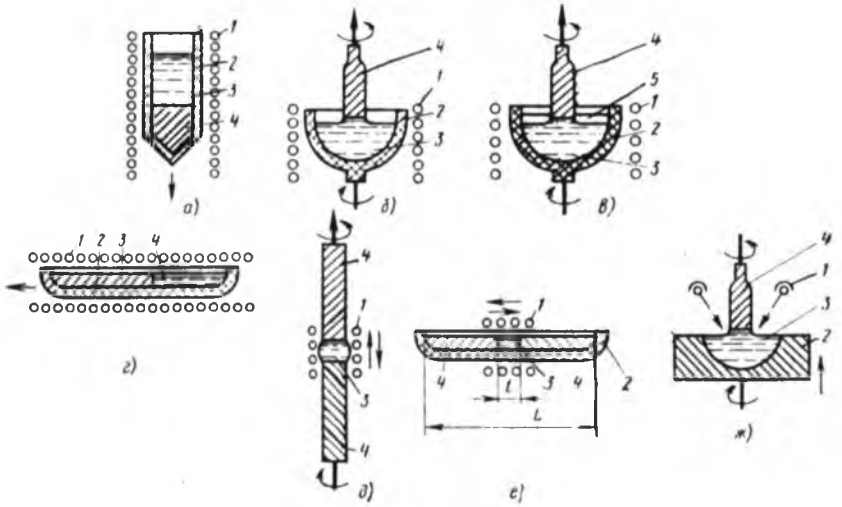


Рис. 42. Схемы процессов направленной кристаллизации расплавов:

а, *г* — вертикальный и горизонтальный методы Бриджмена; *б* — обычный метод Чохральского (из простого тигля); *в* — метод Чохральского герметизацией расплава флюсом; *д* — метод зонной плавки вертикальный бестигельный; *е* — горизонтальный контейнерный метод зонной плавки; *ж* — гарниссажный метод Чохральского (с электронно-лучевым нагревом);
1 — нагреватель; *2* — контейнер; *3* — расплав; *4* — кристалл; *5* — герметизирующая жидкость (флюс); *L* — длина слитка; *l* — длина расплавленной зоны

ва в ходе процесса, называют зонной плавкой или зонной перекристаллизацией (рис. 42, *д — ж*).

Вертикальный процесс направленной кристаллизации по методу Бриджмена проводят в трубчатых контейнерах (тиглях), а горизонтальный — в лодочках.

По методу Чохральского монокристалл вытягивается верхним штоком с закрепленной на нем затравкой кристалла из расплава, помещенного в тигель, соединенный с помощью подставки с нижним штоком. Отсутствие контакта растущего кристалла со стенкой контейнера позволяет получать методом Чохральского ориентированные в требуемом кристаллографическом направлении большие, равномерно легированные совершенные монокристаллы.

Процесс направленной кристаллизации без перегрузки слитка может быть осуществлен однократно, а зонной плавкой — многократно. Зонную плавку наиболее часто используют для получения чистых полупроводников, так как переход от одного процесса к другому связан с загрязнением конечного продукта.

Требования к параметрам монокристаллов полупроводников постоянно повышаются и тенденцию их изменения можно проследить на примере кремния:

	1960 г.	1965 г.	1970—1980 гг.	1985—1990 гг.
Диаметр монокристалла кремния, мм	12,7—25,4	25,4—50,8	50,8—76,2	101,6—152,4
Радиальный разброс удельного сопротивления, %	30	20	15	5
Плотность дислокаций, $\times 10^4$, $см^2$	5	1	0,1	$<0{,}01$
Масса слитка, кг	0,2	1	4	>6

Рассмотрим оборудование для выращивания монокристаллов полупроводников на примере метода Чохральского.

2. КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Современная установка для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского должна обеспечить:

поддержание в камере остаточного давления менее $1{,}33 \cdot 10^{-4}$ Па для случая проведения процесса выращивания в вакууме;

отсутствие загрязнений расплава и выращиваемого монокристалла;

стабильность тепловых условий выращивания монокристаллов (колебания температуры на фронте кристаллизации допускаются 0,1—0,2 °С, точность контроля температуры нагревателя $\pm 0{,}1$ °С);

высокую точность поддержания выбранных скоростей перемещения деталей установки (точность подъема тигля и заправки ± 1 %, скорости вращения штоков ± 5 %);

отсутствие вибраций;

возможность изменения основных параметров процесса.

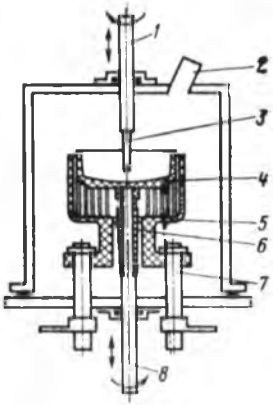


Рис. 43. Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского:

1 — верхний шток; *2* — смотровое окно; *3* — монокристаллическая затравка; *4* — графитовый тигель; *5* — графитовый нагреватель; *6* — графитовая подставка тигля; *7* — водоохлаждаемый токоввод; *8* — нижний шток

Схема установки для выращивания монокристаллов методом Чохральского изображена на рис. 43.

Процесс проводится в герметичной камере в атмосфере инертного газа или в вакууме. Стенки камеры имеют водяное охлаждение. Камера снабжена смотровым окном *2* для визуального наблюдения за ходом процесса. Исполнительные механизмы расположены вне камеры. Исходный материал для выращивания монокристалла помещают в тигель *4*, закрепленный на графитовой подставке *6*, соединенной с водоохлаждаемым штоком *8*. Нагрев тигля с исходной загрузкой осуществляется разрезным графитовым нагревателем сопротивления *5*, установленным на токовводах *7*, смонтированных в нижней крышке камеры. Снаружи нагреватель окружен системой графитовых экранов (на рис. 43 они не показаны), обеспечивающих заданное распределение температуры по объему расплава в тигле, а также по длине и сечению выращиваемого монокристалла. Шток *8* выведен из камеры через уплотнения Вильсона. При помощи электропривода, расположенного вне камеры, шток вращается с постоянной частотой. При этом он может перемещаться вверх или вниз для обеспечения оптимального положения тигля с расплавом по отношению к нагревательному элементу. Через уплотнения Вильсона, расположенные на верхнем конце камеры соосно с нижним штоком, в камеру вводится водоохлаждаемый шток *1*. На нижнем конце штока при помощи цангового крепления фиксируется монокристаллическая затравка *3* кристаллизуемого материала. Шток *1* может также перемещаться вверх и вниз с заданной скоростью и вращаться с постоянной частотой. В процессе роста кристалл и тигель с расплавом вращаются в противоположных направлениях.

Установка имеет вакуумную систему для создания остаточного давления в камере менее $6{,}9 \cdot 10^{-3}$ Па, а также систему подачи инертного газа. Максимальное избыточное давление инертного газа в камере может доходить до $0{,}7 \cdot 10^5$ Н/м². Рабочая скорость перемещения затравки изменяется в пределах 0,5—5,0 мм/мин. Осевое перемещение затравки позволяет выращивать монокристаллы до 500 мм. Частота вращения затравки 10—80 об/мин, а тигля 4—28 об/мин. Осевое перемещение тигля на расстояние около 40 мм осуществляется от ручного привода.

Процесс проводится следующим образом: тщательно протравленный, промытый и высушенный материал загружают в тигель,

камеру, предварительно очищенную, герметизируют и откачивают до получения вакуума или продувают чистым инертным газом.

Тигель устанавливают на нужной высоте по отношению к нагревателю и приводят во вращение. При постепенном повышении мощности, подаваемой на нагреватель, материал доводят до плавления и выдерживают некоторое время в перегретом состоянии. Для предотвращения осаждения летучих примесей на затравку ее подводят к зеркалу расплава в горячую зону. Когда зеркало расплава очистится, включают систему автоматического регулирования температур, которая доводит температуру расплава до значения, немного превышающего температуру плавления материала. Затравку медленно подводят к зеркалу расплава, конец затравки опускают в расплав на 2—3 мм, а шток *1* останавливают. После прогрева затравки в течение 3—5 мин приступают к выращиванию монокристалла, вытягивая шток с затравкой.

В качестве примера можно привести следующие допуски на механические и температурные режимы выращивания монокристаллов:

Частота вращения нижнего штока, об/мин	10—15±5%
Точность фиксации высоты тигля по отношению к нагревателю при постоянной массе материала, мм	±1
Частота вращения верхнего штока, об/мин	40—60±3%
Скорость вытягивания штока, мм/мин	0,5—2,5
Допустимые колебания средней скорости вытягивания, мм/мин	±0,05
Соосность штоков, мм	0,1
Биение на концах штоков, мкм	10—20
Точность поддержания температуры в тигле с материалом, °	±0,1—0,2

Колебания скорости потока инертного газа, продуваемого через рабочую камеру, не должны вызывать изменений температуры, превышающих указанную точность стабилизации.

3. КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ УЗЛОВ УСТАНОВОК ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Конструкция теплового узла определяет распределение температур (тепловые поля) в расплаве и растущем монокристалле. Тепловой узел состоит из подставки, тигля, нагревателя и системы экранов.

Для выращивания однородных по свойствам монокристаллов методом Чохральского необходимо выполнение следующих условий: самая холодная точка должна быть расположена в месте касания затравки с расплавом; тепловое поле должно быть симметрично относительно оси; расплав вне области границы раздела фаз должен быть перегрет с целью исключения спонтанной кристаллизации.

Тепловые условия процесса определяют осевые и радиальные градиенты температуры в кристалле и расплаве, от которых зависят форма фронта кристаллизации и термические напряжения в

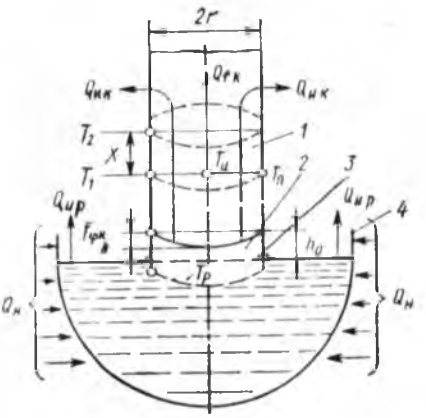


Рис. 44. Схема тепловых потоков и изотерм в системе расплав — кристалл при выращивании монокристалла методом Чохральского:

1 — кристалл; *2* — столбик расплава; *3* — переохлажденная область расплава; *4* — тигель; *б* — стрела прогиба фронта кристаллизации; h_0 — высота столбика расплава; $T_{фи}$ — температура на фронте кристаллизации; $T_р$ — температура изотермы, ограничивающей переохлажденную область расплава

монокристалле, а также размеры переохлажденной области расплава вблизи фронта кристаллизации.

Схема тепловых потоков и изотерм в системе расплав — кристалл показана на рис. 44. Поток тепла $Q_{нь}$, поступающий к тиглю от нагревателя, равен сумме потоков тепла, отводимых излучением от расплава $Q_{ир}$ теплопроводностью $Q_{тк}$ и излучением $Q_{ик}$ от кристалла. Соотношение этих потоков определяет характер градиентов температуры, а следовательно, и изотерм в выращиваемом монокристалле. Радиальный градиент температуры G_r определяется разностью температур в сечении кристалла на его поверхности $T_п$ и в центре $T_ц$:

$$G_r = \Delta T_r/r = (T_ц - T_п)/r,$$

где r — радиус кристалла, а осевой градиент температуры в кристалле G_x — разностью температур по его длине:

$$G_x = \Delta T_x/x = (T_1 - T_2)/x,$$

где x — расстояние по длине кристалла.

Для получения совершенных кристаллов нужно на протяжении всего процесса выращивания сохранять плоской границу раздела кристалл — расплав. Для этого необходимо, чтобы изотермы были практически перпендикулярными направлению роста, а также обеспечивался тщательный контроль тепловых потоков как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Теплота кристаллизации поступает в растущий кристалл снизу через фронт кристаллизации в направлении от расплава к кристаллу и рассеивается за счет теплопередачи теплопроводностью через кристалл к подъемному механизму и излучения. Создав в установке для выращивания с помощью экранов или дополнительных нагревателей для подогрева растущего кристалла тепловые условия, при которых радиальный тепловой градиент незначителен, можно получить изотермы в расплаве, перпендикулярные направлению роста.

Осевой градиент определяется следующими факторами:

1. Расположением нагревателей. При индукционном нагреве — формой индуктора и расположением в нем тигля, материалом и

размерами тигля и приемника индукционных токов; при использовании нагревателей сопротивления — геометрией нагревателя и положением тигля относительно нагревателей.

2. Теплоотводом в окружающее пространство. Теплоотвод определяется близостью тигля к краю индуктора или к краю печи; температурой помещения; размерами и теплопроводностью кристалла; температурой держателя кристалла; излучательной способностью поверхности расплава и отражательной способностью стенок печи.

3. Глубиной расплава в тигле.

4. Скоростью вытягивания и скрытой теплотой плавления. Для уменьшения радиальной асимметрии теплового поля и перемешивания расплава кристалл и тигель с расплавом вращают в противоположных направлениях. При увеличении скорости кристаллизации выделяется повышенное количество тепла (за счет скрытой теплоты плавления) на фронте кристаллизации и осевой градиент уменьшается.

Тепловой узел является средством управления тепловыми условиями процесса выращивания монокристалла полупроводника. От его конструкции зависят устойчивость роста, стабильность диаметра и структура выращиваемого монокристалла. Стабильность диаметра требует поддержания неизменяющихся в ходе процесса градиентов температуры в расплаве, а условием получения совершенной структуры монокристалла является создание и поддержание в течение всего процесса плоского фронта кристаллизации. Схемы наиболее распространенных тепловых узлов, применяемых в установках для выращивания монокристаллов полупроводников методом Чохральского, приведены на рис. 45.

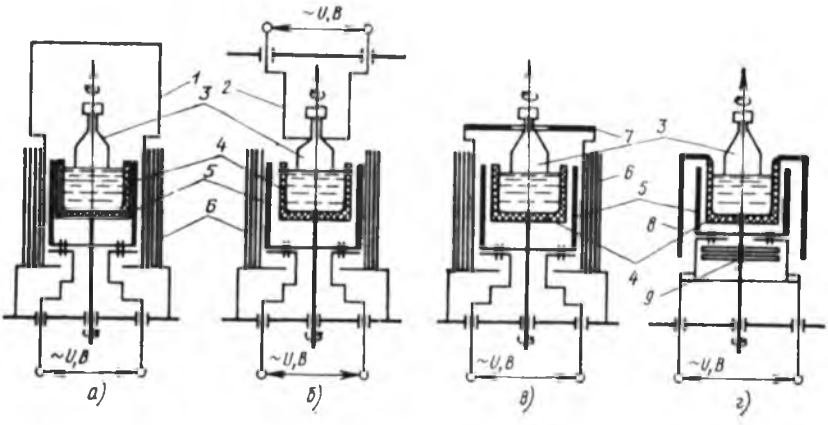


Рис. 45. Схемы тепловых узлов с различными видами экранировок:

а, в — **пассивные (полузакрытая и закрытая)**; *б* — **активная**; *г* — **открытая (подвижная)**; *1* — верхний боковой экран; *2* — нагреватель кристалла; *3* — кристалл; *4* — графитовая **подставка с кварцевым тиглем**, содержащим расплав; *5* — нагреватель тигля; *6* — **боковые экраны**; *7* — **потолочный экран**; *8* — вращающийся боковой экран; *9* — донные экраны

Тигель. Форма дна тигля (плоская или сферическая) оказывает влияние на распределение температуры в расплаве. В тиглях с плоским дном вследствие наличия «углов» конвекция в расплаве по всему объему не обеспечивает равномерного перемешивания расплава по всему объему. В этом отношении лучшие результаты получаются при использовании тиглей со сферическим дном. Сферическая форма тигля, обеспечивая постоянное отношение поверхности расплава к его высоте и равномерное перемешивание расплава по всему объему конвективными потоками, позволяет получать меньшие линейные осевые градиенты температуры по расплаву, чем в случае плоской формы дна тигля.

Оптимальное соотношение внутреннего диаметра тигля D и высоты расплава H находится в пределах 0,5—1,0.

Оптимальное соотношение диаметра тигля D и диаметра выращиваемого из него монокристалла кремния и германия d составляет 2,5—3,5.

Материал контейнера должен удовлетворять следующим требованиям:

быть инертным по отношению к содержащемуся в нем расплавленному металлу или полупроводнику, а также к атмосфере, в которой производится выращивание;

не смачиваться расплавом;

иметь теплопроводность более низкую, чем загрузка, что необходимо в связи с проблемами оптимального теплопереноса в процессе роста кристалла;

не загрязнять расплав примесями при соприкосновении его со стенками контейнера.

Одним из основных контейнерных материалов для выращивания монокристаллов германия и кремния является высокочистый синтетический кварц. Кварц имеет очень низкий коэффициент теплового расширения ($5{,}8 \cdot 10^{-7}$) и поэтому способен выдерживать без разрушения большие температурные градиенты и термические удары. Температура размягчения кварца выше 1300 °С. Из кварца в получаемый кристалл переходит в основном кислород.

Перспективными материалами для контейнеров являются стеклоуглерод, нитриды кремния, алюминия и бора.

Подставка тигля. Она представляет собой полую внутри графитовую трубку. Конструкция подставки оказывает влияние на градиенты температуры в расплаве и монокристалле. Так, например, если дно подставки намного толще боковых стенок, то отвод тепла от расплава в осевом направлении, а следовательно, и градиент температуры в данном направлении уменьшаются. Увеличение толщины стенок подставки влечет за собой повышение температуры нагревателя и в случае, если тепловой узел аналогичен показанному на рис. 45, *а*, в окружающее монокристалл пространство над тиглем поступает большее количество тепла, что влечет за собой изменение осевых и радиальных градиентов температуры в растущем монокристалле.

Система экранировки. Существующие системы экранировки тигля с расплавом можно разделить на закрытые (рис. 45, *в*) и открытые (рис. 45, *г*). Закрытые системы экранировки обеспечивают малые осевые и радиальные градиенты температуры по расплаву в тигле. В область над тиглем, ограниченную потолочным экраном, поступает дополнительное количество тепла, вследствие чего градиенты температуры в выращиваемом монокристалле уменьшаются. В случае использования открытой системы экранировки вследствие повышенных потерь тепла с открытой поверхности расплава осевые градиенты по расплаву значительно больше.

Система экранировки позволяет управлять осевыми и радиальными градиентами температуры в расплаве и в выращиваемом монокристалле.

Чем меньше градиент температуры в растущем кристалле, тем совершеннее его структура, но уменьшение осевого градиента снижает скорость вытягивания последнего. Экранировка выращиваемого монокристалла может быть пассивной (экраны) или активной (нагреватель, сопротивления, рис. 45, *б*).

Достоинством активной экранировки является создание требуемого градиента температуры в монокристалле и возможность управлять температурным полем в кристалле после окончания процесса выращивания с целью улучшения структуры монокристалла и уменьшения в нем напряжений.

Показанный на рис. 45, *г* вариант теплового узла с вращающейся экранировкой благодаря строгой соосности ее с тиглем, обеспечивает высокую симметрию теплового поля в расплаве, сводя к минимуму знакопеременные напряжения в кристалле.

Выбор материала экранов зависит от характера атмосферы, в которой работает тепловой узел. В вакууме, где теплопередача происходит в основном излучением, экраны целесообразно изготавливать из полированных листов жаропрочного металла, например молибдена.

В газовой среде увеличивается вклад в перенос тепла от элементов теплового узла стенкам камеры установки за счет конвекции газа. Потери тепла конвекцией возрастают с увеличением давления газа и его теплоемкости.

При работе в газовой среде, особенно находящейся под высоким давлением, применяют экраны из графита или непрозрачного (спеченного) кварца. Возможно изготовление одних экранов из графита, а других из молибдена.

Требуемые по технологии тепловые условия процесса выращивания монокристаллов создают путем подбора соответствующих конструкций подставки, нагревателя и экранировки. Воздействие отдельных элементов теплового узла на градиенты температуры в расплаве и монокристалле носит комплексный характер. Изменение одного элемента, как правило, требует соответствующего изменения других с целью сохранения первоначальных тепловых условий.

4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ НА ИХ СВОЙСТВА

Рассмотрим влияние параметров процесса выращивания монокристаллов, связанных с конструкцией установки, на свойства кристаллов. Свойства выращиваемых монокристаллов определяются режимами выращивания и конструктивными параметрами: расположением тигля с расплавом по отношению к нагревателю, размерами и формой тигля с подставкой, частотой вращения затравки и тигля, скоростью подъема затравки, экранировкой, конструкцией нагревателя и др.

В методе Чохральского объем кристаллизующегося расплава в тигле значителен и поэтому гидродинамические потоки в расплаве оказывают существенное влияние на форму диффузионного слоя на фронте кристаллизации. На рис. 46 показаны различные виды распределения гидродинамических потоков в расплаве и их влияние на форму диффузионного слоя на фронте кристаллизации монокристалла, выращиваемого методом Чохральского. При отсутствии вращения кристалла *2* и тигля с расплавом *1* возникают конвективные потоки жидкости *4*, направленные от горячих стенок тигля к более холодной центральной части расплава (рис. 46, *а*). При этих условиях диффузионный слой *3* имеет наибольшую толщину в центре, а наименьшую — у периферии кристалла, что приводит к увеличению содержания примеси в центре его сечения по сравнению с периферией.

При вращении тигля (рис. 46, *б*) расплав центробежными силами отбрасывается к его стенкам, вследствие чего в центральной части расплава возникают потоки жидкости, которые имеют одинаковое направление с тепловыми конвекционными потоками, в результате неоднородность распределения примеси по сечению кристалла увеличивается.

При вращении кристалла вращающаяся в расплаве плоская поверхность действует подобно колесу центробежного насоса, создающего в расплаве вертикальные потоки жидкости (рис. 46, *в*).

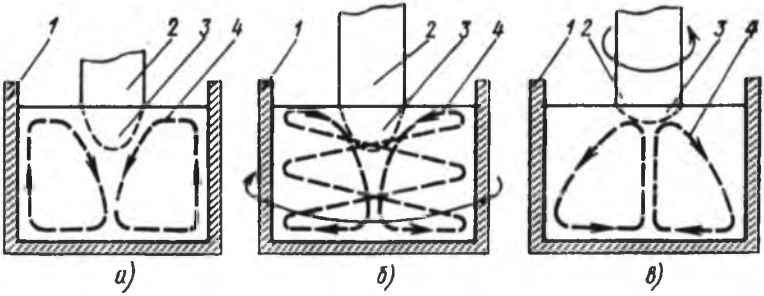


Рис. 46. Различные виды распределения гидродинамических потоков в расплаве: *а* — без вращения; *б* — с вращением тигля (25 об/мин); *в* — с вращением кристалла (100 об/мин)

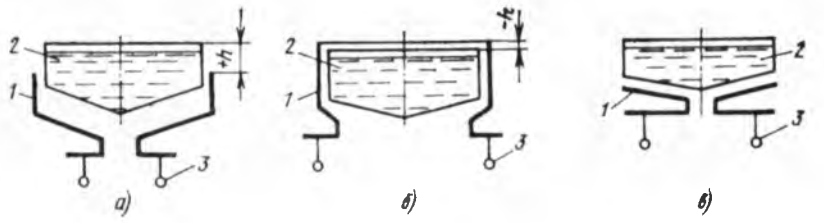


Рис. 47. Схема нагревателей для вытягивания монокристаллов германия:
а — донно-боковой; *б* — боковой; *в* — донный;
1 — нагреватель; *2* — тигель с расплавом; *3* — шины питания

Направление этих потоков жидкости в центральной части кристалла противоположно направлению тепловых конвекционных потоков, что уменьшает неравномерность толщины диффузионного слоя и, как следствие, неравномерность распределения примесей по поперечному сечению кристалла.

При одновременном вращении тигля и кристалла в расплаве возникают сложные потоки жидкости. Установлено, что кристалл нужно вращать с максимально возможной, а тигель — с минимальной скоростями. Вращение тигля необходимо для обеспечения симметрии теплового поля в области расплава.

На распределение температуры в расплаве можно воздействовать конфигурацией и расположением нагревателей, формой тигля, верхней экранировкой тепловой зоны и технологическими перемещениями.

Рассмотрим температурные поля в расплаве для трех типов нагревателей (рис. 47). При выбранных параметрах, скорости подъема кристалла, частоте вращения тигля и затравки, а также фиксированном положении тигля относительно нагревателя осуществляли выращивание монокристалла германия. В процессе роста слитка в определенные моменты времени в 4—5 сечениях объема расплава измеряли температуры с помощью девяти термопар, помещенных в графитовый диск, опускаемый в расплав с помощью специального приспособления. Обработка опытных данных сводилась к построению изотермических поверхностей в объеме тигля. После обработки опытных данных сравнивали величины разброса удельного сопротивления по сечению кристаллов, полученных при различных тепловых полях.

На рис. 47, *а* показана схема наиболее распространенного донно-бокового нагревателя для выращивания монокристаллов германия. Было установлено, что чем глубже тигель погружали в нагреватель, тем режим выращивания становился более неустойчивым. При значениях $h = -5{,}0 \div -20{,}0$ мм (где h — расстояние между верхней кромкой нагревателя и кромкой тигля) вырастить кристалл с постоянным диаметром представляло значительные трудности. Малейшие изменения частоты вращения и скорости подъема затравки отражались на размерах слитка. Установка тиг-

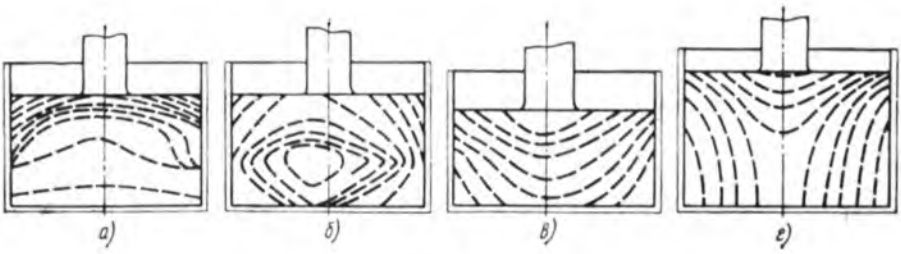


Рис. 48. Изотермы в расплаве

ля выше торцевой кромки нагревателя на $h=+5{,}0\div+15{,}0$ мм делала режим более устойчивым.

На рис. 48 изображены изотермы в расплаве под кристаллами германия, выращенными при различных технологических параметрах (табл. 8).

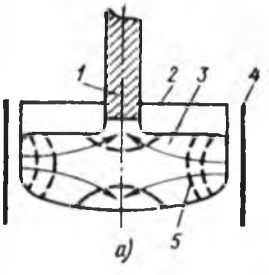
Таблица 8. **Влияние параметров выращивания монокристаллов германия на разброс удельного сопротивления по сечению**

Вид изотермы в расплаве	Частота вращения, об/мин		Скорость подъема кристалла, мм/мин	h, мм	Разброс удельного сопротивления по сечению монокристалла, %
	затравки	тигля			
Рис. 48, *а*	60	5,0	2,0	+10,0	(+3,3)—(+4,95)
Рис. 48, *б*				0,0	(+14,5)—(—11,1)
Рис. 48, *в*	20	10		—15,0	(+15,5)—(—11,2)
Рис. 48, *г*	60				(+10,0)—(—7,7)

Из сравнения изотерм в расплаве, выращенных в различных условиях (рис. 48, *а*, *б*), видно, что при положении тигля, когда $h=+10{,}0$ мм (рис. 47, *а*), изотермы под фронтом кристаллизации плоские или почти плоские и расположены ближе друг к другу. Все монокристаллы, выращенные в условиях стабильного роста, имели разброс удельного сопротивления по радиусу в пределах $\pm5{,}0$ %, а во всех других случаях значения этих величин превышали 10,0 %.

Для нагревателей, изображенных на рис. 47, *а* и *б*, производилась оценка влияния частоты вращения затравки от 10 до 60 об/мин и тигля от 2 до 20 об/мин на формирование полей температур в расплаве и качество получаемых слитков. Увеличение частоты вращения затравки приводит к спрямлению изотермических поверхностей в расплаве и уменьшению разброса удельного сопротивления по сечению кристалла.

Хорошее перемешивание расплава за счет потоков естественной конвекции сглаживает эффект механического перемешивания. На рис. 48, *в*, *г* приведены результаты измерений теплового поля



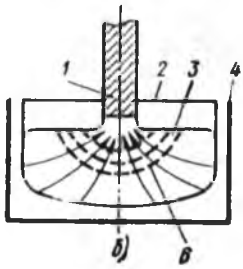


Рис. 49. Форма изотерм (пунктир) и потоков тепла (стрелки) в расплаве для нагревателей: *а* — бокового; *б* — донно-бокового; *1* — кристалл; *2* — тигель; *3* — расплав; *4* — нагреватель; *5*, *6* — градиенты температуры

при частотах вращения слитков 20,0 и 60,0 об/мин и одинаковыми частотами вращения тигля и скоростями подъема затравки.

Таким образом, из рассмотрения основных наиболее часто встречающихся типов нагревателей и создаваемых ими температурных полей в расплаве можно сделать следующий вывод: боковой нагреватель создает большой осевой градиент *5* температуры в расплаве (рис. 49, *а*), а донно-боковой нагреватель создает плавный осевой градиент *6* температуры (рис. 49, *б*).

Примесные неоднородности, называемые примесными полосами, могут возникать в растущем кристалле из-за асимметрии теплового потока расплава или фронта кристаллизации; периодических колебаний температуры в расплаве, обусловленных взаимодействием тепловых и гидродинамических процессов, протекающих в расплаве; а также периодических или случайных колебаний в кинематических системах вращения, температур нагревателя или камеры печи, вибрации.

Для уменьшения тепловой асимметрии и градиентов температуры в расплаве, приводящих к примесной неоднородности монокристалла, используют тепловую трубу, которая представляет собой вставленные друг в друга цилиндры, запаянные сверху и снизу. В образовавшуюся полость между цилиндрами помещают теплоноситель (натрий), который, испаряясь в горячей печи, поглощает тепло, а перемещаясь в холодную, конденсируется, выделяя тепло. Внутри тепловой трубы, т. е. в область изотермических температур, помещают тигель с расплавом.

При выращивании монокристаллов германия, легированных галием, тепловую трубу устанавливают между нагревателем и тиглем таким образом, чтобы верхний край трубы несколько выступал над нагревателем и тиглем, а нижний край находился заподлицо с нагревателем. Наличие тепловой трубы уменьшает градиент температуры в расплаве, а следовательно, и тепловую конвекцию в расплаве и связанные с ней колебания температуры.

Перспективным методом воздействия на расплав является использование электромагнитного поля, которое создается электромагнитным вращателем, выполненным в виде трех бессердечниковых катушек, смещенных в горизонтальной плоскости одна относительно другой на 120°. Вращатель устанавливали снаружи индуктора при высокочастотном нагреве расплава или вокруг нагрева-

теля с экранами при выращивании монокристалла германия в печи с нагревателем сопротивления. Катушки соединялись через три понижающих трансформатора с трехфазным автотрансформатором общей мощностью 10 кВт, питающимся от сети частотой тока 50 Гц.

Наличие электромагнитного воздействия меняет характер поведения расплава, но не влияет на поведение расплава в столбике, примыкающем к растущему кристаллу.

Электромагнитное вращение расплава уменьшает примесную неоднородность выращиваемого монокристалла, воздействует на фронт кристаллизации, который становится плоским, и на величину так называемой эффективной теплопроводности расплава.

5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

При проведении процесса выращивания монокристалла по методу Чохральского оператор должен контролировать параметры процесса вытягивания кристаллов. Контролируемые параметры процесса выращивания монокристаллов и методы их измерения приведены в табл. 9.

Таблица 9. **Контролируемые параметры процесса выращивания монокристаллов и методы их измерения**

Наименование параметра	Условное обозначение	Метод измерения
Температура тигля	T_1	Пирометр или термопара
Температура поверхности раздела расплав—кристалл	T_2	Пирометр
Температура водяного охлаждения печи на входе	T_3	Резистивный детектор температуры
Температура водяного охлаждения печи на выходе	T_4	
Температура инертного газа на входе	T_5	
Температура инертного газа на выходе	T_6	
Скорость вытягивания кристалла	V_1	Тахометр постоянного тока
Скорость опускания тигля (или нагревателя)	V_2	
Частота вращения кристалла	R_1	
Частота вращения тигля	R_2	
Входная мощность нагревателя	P_1	Преобразователь мощности
Перемещение кристалла в вертикальном направлении	$П$	Потенциометр
Вибрации	B	Акселерометр

Для оперативного управления всеми контролируемыми параметрами процесса выращивания монокристаллов необходимо использовать ЭВМ.

Сигналы от датчиков, размещенных на установке выращивания монокристаллов, считываются и подаются на ЭВМ, которая анализирует полученную информацию и сравнивает с заданными значениями этих параметров. Отклонение параметра от заданного значения используется для автоматической корректировки выбранного параметра. Программирование процесса выращивания монокристалла позволяет выращивать кристаллы с минимальным значением плотности дефектов и контролируемым диаметром слитка.

Анализ себестоимости монокристаллов полупроводников, выращенных методом Чохральского, показывает, что затраты на сырье составляют от 40 до 60 % в зависимости от вида выращиваемого монокристалла, на содержание и эксплуатацию оборудования — от 12 до 16 %, на тигли — от 14 до 25 %, на заработную плату — около 5 %.

Снижение себестоимости монокристаллов полупроводников возможно за счет рационального использования сырья, основных и вспомогательных материалов и увеличения выхода готовой продукции в результате внедрения в производство принципиально новых технологических процессов и установок, рассчитанных на повышенную загрузку исходного материала в тигель.

Совершенствование оборудования для выращивания монокристаллов материалов электронной техники идет в направлении создания высокопроизводительных установок, управляемых ЭВМ, например, в установках для выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского можно выращивать монокристаллы кремния диаметром до 150 мм и длиной до 2 м.

ГЛАВА 6

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЗКИ СЛИТКОВ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПЛАСТИН ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ СЛИТКОВ

Перед разрезанием слитков полупроводникового материала на пластины нужно определить расположение в нем основных кристаллографических плоскостей. Это необходимо для последующей точной ориентации слитков перед резанием. Несоблюдение этого условия приведет к невоспроизводимости электрофизических параметров полупроводниковых приборов и микросхем в процессе последующей обработки на операциях диффузии, эпитаксии и некоторых других. Поэтому для получения пластин, достаточно точно ориентированных в заданной плоскости, определяют, насколько и как ось слитка отклонена от кристаллографической оси. При этом используют два способа ориентации монокристаллических слитков: рентгеновский и оптический.

Рентгеновский способ основан на изменении интенсивности отражения рентгеновских лучей от поверхности полупроводникового материала в зависимости от плотности упаковки атомов в данной плоскости. Чем больше эта плотность, тем интенсивнее отражение рентгеновских лучей. Так как плоскость (111) наиболее плотно упакована атомами, то ей и соответствует наибольшая интенсивность отраженных лучей.

В практике для ориентации слитков большее применение находит оптический метод. Он заключается в том, что если торец слитка предварительно отполировать и обработать в селективном травителе, то вследствие различной скорости травления по разным кристаллографическим направлениям на поверхности торца будут выявлены в зависимости от ориентации затравки наиболее развитые грани плоскостей (100), (110), (111).

При последующем освещении торца слитка параллельным пучком света по характеру фигуры, образуемой отраженным лучом, и положения ее центра на экране прибора судят об ориентации слитка.

Схема установки ориентации слитков оптическим методом показана на рис. 50. Все узлы смонтированы в светозащитном корпусе *6*. Осветительная система расположена в нижней части установки, отделенной перегородкой *5*, и состоит из осветителя *1*, конденсора *2* и диафрагмы *3*. Зеркало *4* через фокусирующий объектив *9* и зеркала *10* и *11* направляет пучок света на торец слитка, укрепленного в кристаллодержателе *13*.

Фокусирующий объектив имеет зубчатые пары *7* и *8* для юсти-

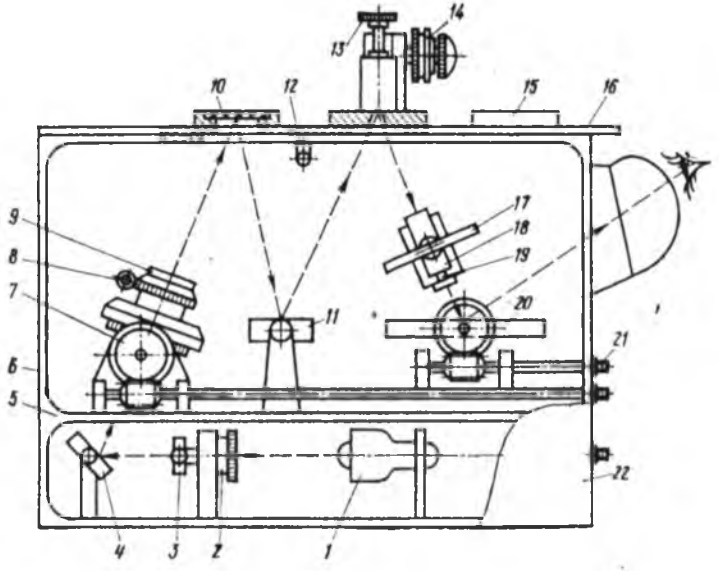


Рис. 50. Схема установки ориентации слитков оптическим методом

ровки фокусного расстояния и подбора размера диафрагмы, ручки управления которыми выведены наружу. Подвижная плита *16* может перемещаться в шариковых направляющих влево до тех пор, пока слиток не встанет в положение, занимаемое зеркалом *10*, и фиксироваться стопором *12*. При этом на место слитка становится зеркало *15* и длина пути отраженного луча, падающего на матовый экран *17*, увеличивается. Это сделано с целью повышения точности ориентации кремниевого слитка.

В положении, изображенном на рис. 50, расстояние между ориентируемым слитком и экраном равно 114,5 мм. При этом одно деление шкалы отсчета угломерной головки *14*, равное 1 мм, соответствует отклонению кристаллографической оси слитка на угол, равный 15′.

При крайнем левом положении подвижной плиты *16* расстояние между слитком и экраном увеличивается до 572 мм, а одно деление шкалы отсчета угломерной головки соответствует отклонению кристаллографической оси слитка на угол, равный 3′. Положение экрана *17* можно регулировать путем поворота его вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка, и закрепления в нужном положении цанговым зажимом. Кроме того, экран вместе с ползуном *18* с помощью винта *19*, соединенного гибким валом с наружной рукояткой, можно перемещать вдоль направления хода луча.

Зеркало *20* с приводом *21* позволяет визуально наблюдать световую фигуру отражения, получаемую на экране. Отсек *22* служит для размещения электрического блока.

Выверенное положение кристаллографических осей слитка фиксируют и в дальнейшем учитывают и сохраняют при разрезке слитков на пластины.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ РЕЗКИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Полупроводниковые материалы, обладающие высокой твердостью и хрупкостью, не поддаются механической обработке с применением большинства обычных методов, таких, как точение, фрезерование, сверление, штамповка и т. п. Практически единственным методом, применимым для механической обработки полупроводниковых материалов, является обработка с применением связанных или свободных абразивов.

Метод резки монокристаллов на пластины металлическим диском с внутренней алмазной режущей кромкой (рис. 51) в настоящее время практически вытеснил все ранее применявшиеся методы резки: дисками с наружной алмазной режущей кромкой, полотнами и проволокой с применением абразивной суспензии. Этот способ получил наибольшее распространение потому, что он обеспечивает более высокую производительность при меньшей ширине реза, в результате чего потери полупроводникового материала снижаются почти на 60 % по сравнению с резкой диском с наружной режущей кромкой.

Режущим инструментом станка является тонкое (толщиной 0,1—0,15 мм) металлическое кольцо, на кромку отверстия которого нанесены алмазные зерна размером 40—60 мкм.

Инструмент крепят винтами на конце шпинделя вращающегося с частотой 3—5 тыс. об/мин, к барабану (рис. 52) с помощью колец, имеющих сферический выступ на одном и соответствующую впадину на другом, чем обеспечивается необходимый предварительный натяг диска. Окончательное натяжение диска обеспечивается при установке его на барабан *1*. Стягивающими винтами *7* уменьшают зазор между буртиком *2* барабана *1* и зажимными

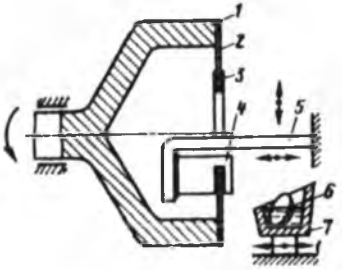


Рис. 51. Схема резки диском с внутренней алмазной режущей кромкой:

1 — головка шпинделя; *2* — диск; *3* — алмазная режущая кромка; *4* — слиток; *5* — держатель; *6* — пластина; *7* — сборник с водой для пластин

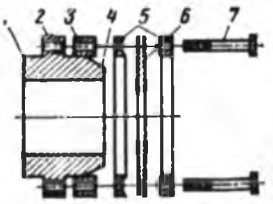


Рис. 52. Барабан для закрепления диска с внутренней алмазной режущей кромкой

кольцами *5*. Режущий диск *6* при этом упирается в опорный выступ *4* барабана и растягивается в радиальном направлении. Между зажимными кольцами и буртиком барабана устанавливают регулирующие прокладки *3*, которые ограничивают перемещение колец *5* и предохраняют диск от разрыва из-за чрезмерного натяжения. Равномерного натяжения диска достигают последовательным постепенным затягиванием диаметрально расположенных винтов *7*. На некоторых моделях машин, например «Алмаз-6М», натяг диска обеспечивается закачкой жидкости (например глицерина) в полость между зажимными кольцами (рис. 55).

Все виды конструктивных компоновок выпускаемых в настоящее время станков для резки слитков полупроводниковых материалов можно разделить на три группы:

с горизонтальным расположением шпинделя и суппортом, осуществляющим как дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины, так и подачу резания (рис. 53, *а*);

с вертикальным расположением шпинделя и суппортом, также осуществляющим и дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины, и подачу резания (рис. 53, *б*);

с горизонтальным расположением шпинделя, осуществляющим подачу резания за счет качания его вокруг некоторой оси, и суппортом, осуществляющим только дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины (рис. 53, *в*).

Станки первого типа (рис. 53, *а*), к которым относятся модели 2405, «Алмаз-4», TS-21 и TS-23, появились в промышленности раньше других и являются наиболее распространенными. При такой компоновке горизонтально расположенный шпиндель вращается в подшипниках относительно малого диаметра, что позволяет сравнительно легко обеспечить необходимую частоту вращения, прецизионность и виброустойчивость узла. Недостатком такого типа компоновки станков является достаточно интенсивный износ направляющих суппорта и, как следствие этого, — потеря точности.

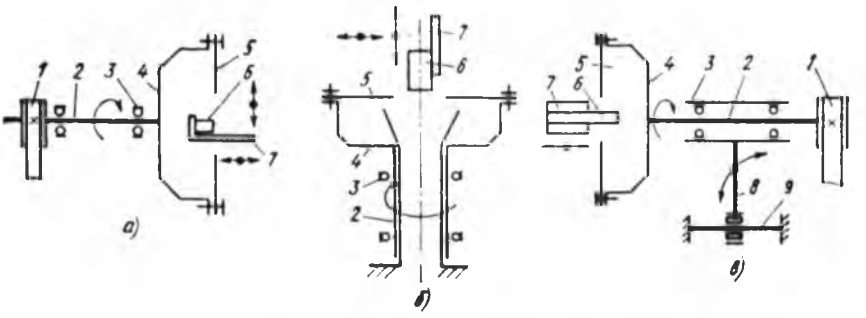


Рис. 53. Схемы конструктивных компоновок станков для резки слитков алмазными кругами с внутренней режущей кромкой:

1 — клиноременная передача; *2* — вал шпинделя; *3* — подшипники; *4* — барабан; *5* — алмазный диск с внутренней режущей кромкой; *6* — слиток; *7* — державка; *8* — поворотный рычаг; *9* — неподвижная ось

Примером станков второго типа компоновки (рис. 53, *б*) является модель ASM10A фирмы «Окамото» (Япония). Вертикальное расположение шпинделя позволяет увеличить длину разрезаемого слитка и производить автоматическое снятие пластин через полый шпиндель. Диаметр шпинделя выбирают таким, чтобы внутри него свободно проходил слиток. Но большой диаметр шпинделя требует применения прецизионных подшипников соответствующего диаметра, а это связано с увеличением линейной скорости, а следовательно, и с усиленным их износом. На станках типа ASM10A можно разрезать слитки диаметром до 95 мм и длиной до 350 мм. Они имеют частоту вращения до $5 \cdot 10^3$ об/мин и пределы продольных дискретных перемещений слитков в интервале 0,2—2,5 мм. Для этих станков также характерным является износ направляющих суппорта, что приводит к сравнительно быстрой потере им точности. Станки, скомпонованные по третьему типу (рис. 53, *в*), являются лучшими по точности. Они имеют подачу резания за счет качания узла шпинделя вместе с патроном и режущим диском вокруг оси на роликовых подшипниках. У суппорта остается только одно движение — перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины. При этом точность и долговечность суппорта повышаются. К станкам этого типа относится «Алмаз-6М».

Станок «Алмаз-6М», предназначенный для резки слитка на пластины полупроводниковых материалов диаметром до 102 мм и длиной до 500 мм отрезными алмазными кругами с внутренней режущей кромкой, показан на рис. 54.

В отличие от станка «Алмаз-4», на «Алмаз-6М» можно обрабатывать слитки большего диаметра и длины. Отрезаемые на станке пластины имеют более высокую чистоту поверхности реза,

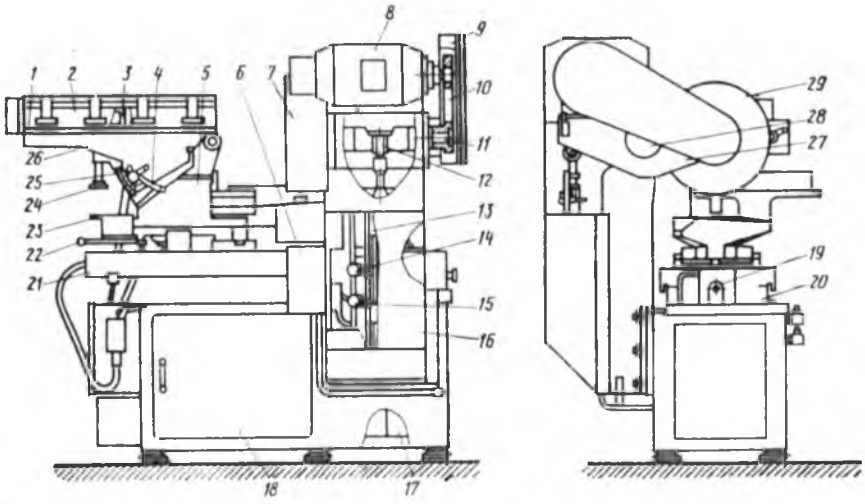


Рис. 54. Станок для резки слитков «Алмаз-6М»

большую точность по толщине и параллельности. Это дает возможность исключить промежуточную технологическую операцию — шлифовку пластин, а также увеличить выход пластин из того же объема исходного материала.

«Алмаз-6М» — высокоточный станок, принцип работы которого основан на разрезании слитка диском с внутренней алмазной режущей кромкой при обильном охлаждении места резания смазывающе-охлаждающей жидкостью, непрерывно циркулирующей и очищаемой в замкнутой системе.

Станок имеет два режима управления — ручной (наладочный) и программный. Программное управление станком обеспечивает резку по одной пластине и резку пакетов. При поштучной резке съем пластин осуществляется автоматически с помощью присоски.

Точное продольное перемещение слитка на требуемую толщину отрезки пластины обеспечивается прецизионным механизмом, состоящим из привода (шагового двигателя) и системы передачи движения на ходовой винт шариковинтовой пары. Шаговой двигатель позволяет осуществлять быстрое перемещение каретки вперед-назад и медленное перемещение в направлении продольной оси слитка.

Поперечная подача режущего диска на слиток осуществляется при помощи коромысла, приводящегося в движение от штока гидроцилиндра. Скорость подачи устанавливается гидравлическим дросселем и выбирается в зависимости от качества инструмента, диаметра заготовки, ее материала и толщины отрезаемых пластин.

Шпиндель станка обеспечивает необходимую частоту вращения инструмента при малом торцевом и радиальном биениях, поэтому возможно отрезать весьма тонкие пластины хрупких материалов с высокой точностью геометрической формы и незначительной шероховатостью поверхности среза. Последнее снижает трудоемкость последующих операций.

Механизм поворота слитка допускает горизонтальную и вертикальную регулировку ориентации в пределах соответственно $\pm 10°$ и $\pm 7°$.

Все механизмы станка смонтированы на массивной станине, имеющей необходимую жесткость и поглощающей возникающие вибрации. Внутри станины установлены блоки с электрической и пневмогидравлической аппаратурой. Органы управления станка вынесены на переднюю панель, в удобное для оператора место.

Станина представляет собой сварную конструкцию, опирающуюся на виброопоры и разделенную внутри на три части. В передней левой части расположены элементы электрической системы управления станком. Доступ к ним осуществляется через двери *18*. В задней левой части расположена пневмогидроаппаратура, а в правой — насосная станция *17*, осуществляющая непрерывную подачу масла к элементам гидравлики. На станине установлена тумба *16*, внутри которой помещен механизм подачи шпинделя.

Механизм подачи шпинделя состоит из гидроцилиндра *13*, нижний конец которого прикреплен к тумбе, а шток — к коромыслу через опору *12*. Опоры дают возможность цилиндру устанавливаться в 2-х взаимно перпендикулярных плоскостях. Упоры *14* и *15* служат для переключения золотника, управляющего величиной хода шпинделя в пределах, необходимых для разрезания слитка определенного диаметра. Максимальный ход штока цилиндра 170 мм. На верхней части тумбы установлено коромысло *27*, качающееся вокруг оси *28* на подшипниках, собранных с нулевым зазором или натягом. На заднем конце коромысла в 4-х радиально-упорных подшипниках установлен рабочий шпиндель. Коромысло качается штоком гидроцилиндра, благодаря чему осуществляется рабочая подача круга и быстрый отвод его в исходное положение. На коромысле установлен также и электродвигатель *8* привода шпинделя, который через плоскоременную передачу *10* приводит во вращение шпиндель *11*. Такая компоновка обеспечивает уравновешивание массы шпинделя электродвигателем и более плавную работу механизма.

Точность выполнения отверстий под шпиндель и под крепление коромысла на тумбе обусловливает точность рабочей подачи режущего диска, а следовательно, и качество реза.

На тумбе закреплены пульты управления электро- и гидроавтоматикой (*6* и *7*), позволяющие управлять станком и производить все манипуляции с рабочего места оператора. В плите *20*, установленной на станине, размещен цилиндр подачи стола и цилиндр-подпор *19*, который отводит стол со слитком после окончания резания на несколько миллиметров от режущего инструмента.

На столе *21* установлен механизм поворота *5* слитка в горизонтальной плоскости, с помощью которого ориентируют слиток с учетом необходимого положения кристаллографических осей по отношению к режущему инструменту в направлении, перпендикулярном продольной подаче. По шкале *23* устанавливают необходимый угол поворота слитка в горизонтальной плоскости (в пределах $\pm 10°$) и фиксируют стопором *22*. В кронштейнах механизма *5* размещено устройство поворота слитка в вертикальной плоскости *26*.

Механизм подачи *2* может поворачиваться по отношению к механизму поворота *5* в вертикальной плоскости в пределах $\pm 7°$ (с отсчетом по шкале *25*) винтом *24*. При этом он фиксируется в в заданном положении стопором *4*. Механизм подачи *2* имеет корпус, в котором крепится слиток. Корпус *3* движется по направляющим *1* механизма поворота *26*. При работе корпус механизма подачи перемещается только в одном направлении — направлении подачи слитка к кругу. Привод механизма подачи осуществляется от шагового двигателя. Наименьшее перемещение — $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ мм.

Шаговый двигатель позволяет осуществлять быстрое перемещение каретки (вперед и назад) и медленное перемещение в направлении подачи слитка.

Вращающиеся части привода шпинделя защищены кожухами

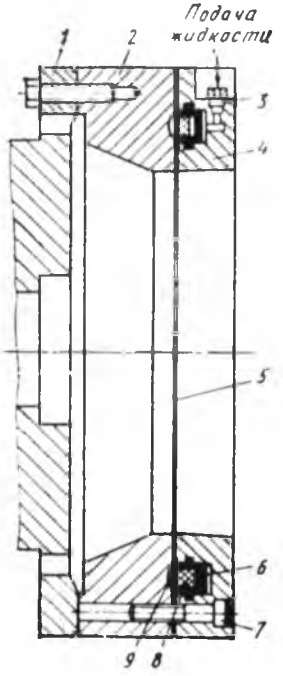


Рис. 55. Барабан с натяжением режущего диска гидравлическим способом:
1 — корпус; *2* — кольцо; *3* — обратный и спускной клапаны; *4* — съемное кольцо; *5* — режущий круг; *6* — уплотнительное кольцо; *7* — винт; *8* — зажимное кольцо; *9* — полость для деформации круга

9 и *29*. В зависимости от размера разрезаемых слитков ($d \leqslant 75$ или 102 мм) на станок устанавливают различные по размерам барабаны. Барабан (рис. 55) состоит из корпуса *1* с фланцем и кольца *2*, скрепленных между собой. К кольцу *2* крепят съемное кольцо *4*, снабженное зажимным, выполненным из резины уплотнительным ным кольцом *6*, внутри которого установлено резиновое кольцо *8*. На кольце *4* имеются обратный и спускной клапаны *3*, через которые соответственно подается и спускается жидкость (глицерин). Жидкость заполняет пространство в пазу между кольцами *4* и *6*, давит на кольцо *6* и через него на кольце *8*. Кольцо *8* зажимает режущий круг, предварительно установленный на кольце *2* по центрирующим штифтам и закрепленный винтами *7*. Кольцо *8*, зажимая режущий круг *5*, вдавливает его в полость *9* кольца *2*. Таким образом, на режущем круге образуется зиг, благодаря которому в нем создаются растягивающие напряжения.

Давление жидкости, находящееся в пределах $98 \cdot 10^5$—$118 \cdot 10^5$ Па, зависит от размеров режущих кругов и необходимой степени натяжения. Первоначальное растяжение нового круга выбирают равным примерно 0,8 % от размера его внутреннего диаметра. По мере ослабления натяжения в процессе резания оно может быть увеличено до 1,5 %.

Величина натяжения оказывает большое влияние на стойкость алмазных дисков. Недостаточное натяжение диска приводит к заворачиванию режущей кромки, под действием радиальной составляющей силы резания, искажению формы отрезаемых пластин, их поломке и т. п. Чрезмерное натяжение диска ведет к его ускоренному износу.

Стойкость режущих алмазных дисков зависит также и от режимов резания, и от вида обрабатываемого материала. Величина стойкости «Т» алмазных дисков связана с основными технологическими факторами эмпирическим соотношением:

$$T = CV^a/S^b,$$

где C — коэффициент, характеризующий обрабатываемый материал; V — скорость резания; S — подача, a и b — постоянные величины.

Скорости резания следует держать близкими к наибольшим допустимым, так как только высокие скорости позволяют получить наибольшую производительность. Эмпирически также найдено, что для полупроводниковых материалов эти скорости должны быть в пределах 20—22 м/с. При них достигаются минимальные деформации и непараллельность плоскостей отрезаемых пластин.

Для получения высококачественного реза с минимальной толщиной нарушенного поверхностного слоя пластины подача S должна быть $\sim$0,01 мм/об для германия и арсенида галлия и 0,008 мм/об для кремния. При частоте вращения шпинделя $5 \cdot 10^3$ об/мин это составляет 50 мм/мин и 40 мм/мин соответственно для германия и кремния. Частоту вращения шпинделя станка выбирают по известной формуле, исходя из принятой максимальной скорости резания и диаметра разрезаемого слитка, определяющего диаметр отверстия с режущей кромкой в рабочем инструменте:

$$n = \frac{60V}{\pi D},$$

где n — частота вращения, об/мин; V — скорость резания, м/с, D — диаметр отверстия режущего диска, м.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ ПЛАСТИН

Для обеспечения необходимых геометрических размеров отрезанных полупроводниковых пластин, их плоскопараллельности и соответствия заданным размерам, а также уменьшения глубины нарушенного слоя пластины подвергаются шлифованию и полированию. Процесс шлифования представляет собой обработку пластин на твердых доводочных дисках — шлифовальниках (из чугуна, стекла, латуни и т. д.) абразивными микропорошками зернистостью от 28 до 3 мкм или алмазными шлифовальными кругами с зернистостью от 120 до 5 мкм. Погрешности формы пластин (неплоскостность, клиновидность и т. д.), возникшие в процессе резки слитка, исправляют в процессе шлифования. В результате шлифования получают пластины правильной геометрической формы с шероховатостью поверхности Ra 0,32—0,04.

На рис. 56 приведен один из возможных вариантов классификации современных шлифовальных станков по виду используемого абразива, характеру (методу) удаления припуска, методу осуществления относительного перемещения инструмента и обрабатываемого изделия. При этом видно, что все многообразие машин в конечном итоге можно разделить на пять групп.

К первой группе станков для одностороннего плоского шлифования связанным абразивом (рис. 57) относятся станки типов МШ-259, СШП-1, СПШП-1. Станки работают по принципу карусельно-шлифовальных и состоят из станины, нижних и верхних шпинделей с приводом и систем электроуправления и охлаждения.

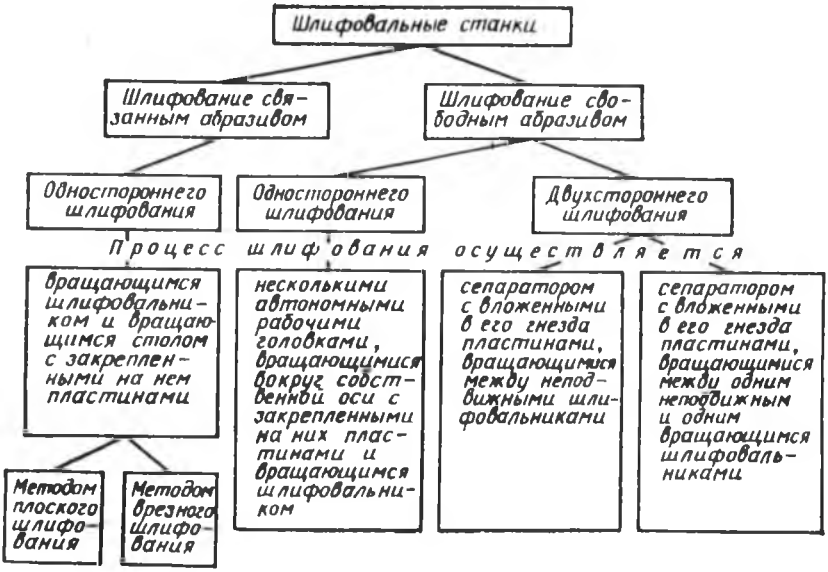


Рис. 56. Классификация современных шлифовальных станков

Станок СПШ-1 на одной станине имеет две позиции обработки с независимыми друг от друга парами шпинделей. Частота вращения верхних шпинделей с абразивными кругами 2400 об/мин, а шлифовальных столиков с закрепленными на них обрабатываемыми пластинами — 350 об/мин. Обычно на одной позиции производится предварительное шлифование, а на другой — чистовое. Подача круга осуществляется за счет массы шпинделя. Станок СПШП-1 является модернизированной моделью станка СПШ-1 и предназначен для прецизионного шлифования алмазным инструментом пластин большого диаметра. Но на станке можно выполнять и операции полирования порошком окиси алюминия или полировальной суспензией. В станках типов СПШ-1, СПШП-1 и МШ-259 предусматриваются съемные столики для наклеивания пластин. Станок типа MPS-R600 фирмы Георг Мюллер (ФРГ) по

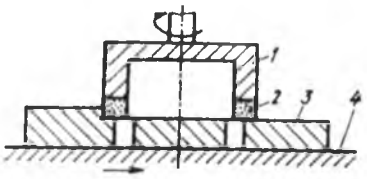


Рис. 57. Схема плоского (торцевого) шлифования:
1 — шлифовальный круг; *2* — алмаз; *3* — обрабатываемые пластины; *4* — стол

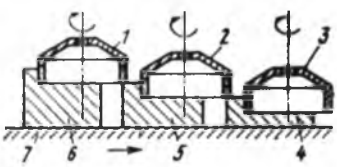
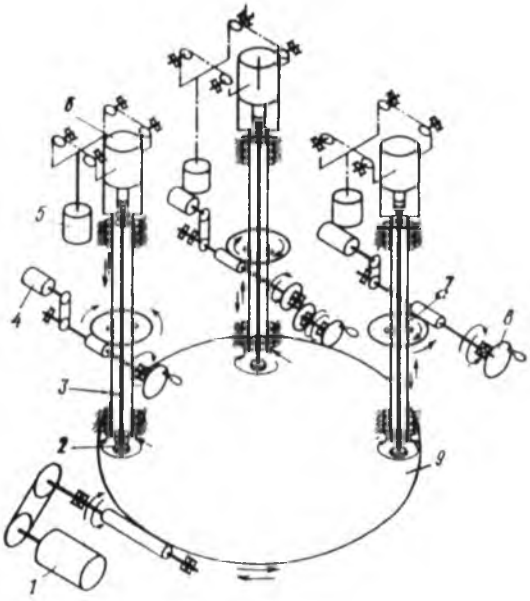


Рис. 58. Схема врезного шлифования:
1—3 — шлифовальные круги; *4—6* — обрабатываемые пластины; *7* — стол

Рис. 59. Кинематическая схема станка САШ-420М



всей площади стола имеет вакуумные присоски, что ускоряет загрузочно-разгрузочные операции и повышает его производительность.

Станки второй группы для одностороннего шлифования связанным абразивом, работающие по схеме врезного шлифования (рис. 58), нашли широкое применение для сошлифовывания слоев большой толщины. Станки типов САШ-3, САШ-420М предназначены для шлифования пластин диаметром до 60 мм, а САШ-150 — диаметром до 150 мм. Все они имеют аналогичные конструктивные схемы. В верхней части массивной литой станины смонтированы по три шпинделя, вращающихся с частотами $9 \cdot 10^3$—$14 \cdot 10^3$ об/мин. В нижней части находится стол с вакуумными присосками для обрабатываемых пластин, вращающийся с частотой 0,5—5 об/мин.

Кинематическая схема станка типа САШ-420М показана на рис. 59. Стол *9* приводится во вращение электродвигателем постоянного тока *1* через клиноременную передачу и червячную пару. Шпиндели *3* вращаются от электрошпинделей *6* через центробежную муфту. Питание электрошпинделей осуществляется от генераторов высокой частоты. Шпиндельный узел уравновешен противовесом *5*. Вертикальная подача шпинделей с абразивным кругом *2* вручную производится вращением маховика *8*, связанного через червячную пару с ходовым винтом *7*, а автоматическая — от электродвигателя *4*.

Шлифовальные станки третьей, четвертой и пятой групп относятся к станкам для шлифования свободным абразивом. Станок третьей группы для одностороннего шлифования свободным абразивом схематично показан на рис. 60. По этой схеме выполнены станки типов В1М3.105 и ЖК.14.09М. Заготовки пластин *4* наклеивают на приспособление *3*, которое удерживается от смещения роликами *6*. Груз *2* создает необходимый прижим пластин к шлифовальнику *5*. Дозатор *1* производит подачу абразивной суспензии. При вращении шлифовальника силы трения вызывают вращение приспособления *3*. Этим создаются условия для равномерной обработки всех пластин. С помощью станков для одно-

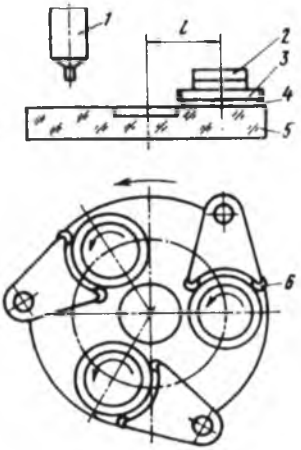


Рис. 60. Схема станка одностороннего шлифования свободным абразивом

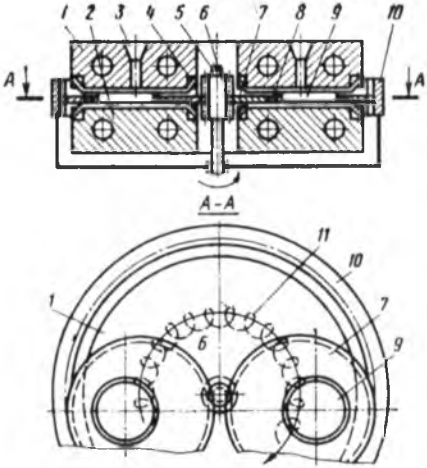


Рис. 61. Схема планетарного механизма станка двусторонней шлифовки и полировки пластин

сторонней обработки пластин можно получить высокое качество обработки одной поверхности. Однако наклейка и переклейка пластин резко ухудшает их геометрические характеристики. Поэтому для получения пластин с высокоточными геометрическими характеристиками применяют станки двусторонней обработки. Главной конструктивной особенностью этих станков является наличие планетарного механизма, перемещающего пластины между шлифовальниками (рис. 61). Движение пластин по сложной *11* траектории усредняет условия обработки и дает возможность получить высокие геометрические параметры изделий.

Обрабатываемые пластины *9* закладывают в отверстия сепараторов *7*, имеющих зубчатый венец, находящийся в постоянном зацеплении с центральной шестерней *6* и периферийным зубчатым колесом *10*. Шестерня *6* закреплена на валу *5*. Зубчатое колесо *10* и шестерня *6* вращаются от одного привода в одну и ту же сторону, но с разными угловыми скоростями. За счет этого сепараторы движутся между шлифовальниками *1*, *2* и в то же время вращаются вокруг собственной оси. Абразивная суспензия подается в зону обработки через отверстия *3* в верхнем шлифовальнике *1*. Загрузку и съем пластин производят при поднятом верхнем шлифовальнике. Для исключения сколов на краях пластин в гнездо сепаратора сначала вкладывают защитное текстолитовое кольцо *8*, внутрь которого помещают обрабатываемую пластину. Зазор между защитным кольцом и сепаратором составляет 0,4—0,8 мм, а между кольцом и пластиной — 0,4—1,5 мм.

В станках четвертой группы сепараторы с вложенными в их гнезда обрабатываемыми пластинами перемещаются между двумя

невращающимися шлифовальниками. По этому типу сконструирован станок ИО 19006. В станках пятой группы для уменьшения износа зубчатого венца сепаратора и его деформации предусмотрено вращение одного из шлифовальников. К станкам этой группы относятся СДШ-100 и СДП-100.

Для полирования пластин могут быть использованы те же станки, что и для шлифования. Для этого на шлифовальниках делают выборки и с помощью внешних и внутренних стальных колец *4* на них натягивают замшу. Для подачи абразивной суспензии в зону полирования в верхнем шлифовальнике и в замше имеются отверстия. К станкам, которые можно использовать как для шлифования, так и для полирования пластин, относятся станки СПШП-1, В1М3 105, ЖК14.09М, СДП-100.

Полирование может быть:

механическим, которое происходит главным образом за счет микрорезания зернами абразива, пластических деформаций и сглаживания;

химико-механическим, при котором снятие материала с обрабатываемой поверхности происходит в основном за счет механического удаления образующихся в результате химических реакций мягких пленок. Для химико-механического полирования необходимо несколько большее усилие прижима обрабатываемого изделия к полировальнику, чем при механическом. Поэтому для этих процессов создан ряд специальных станков, например, моделей СХМП-1, Ю1М3.105.004, Ю1М1.244.000.

Схема полуавтомата одностороннего полирования полупроводниковых пластин типа Ю1М1.244.000 показана на рис. 62. Стол *4*, на котором размещен съемный полировальник *8*, приводится во

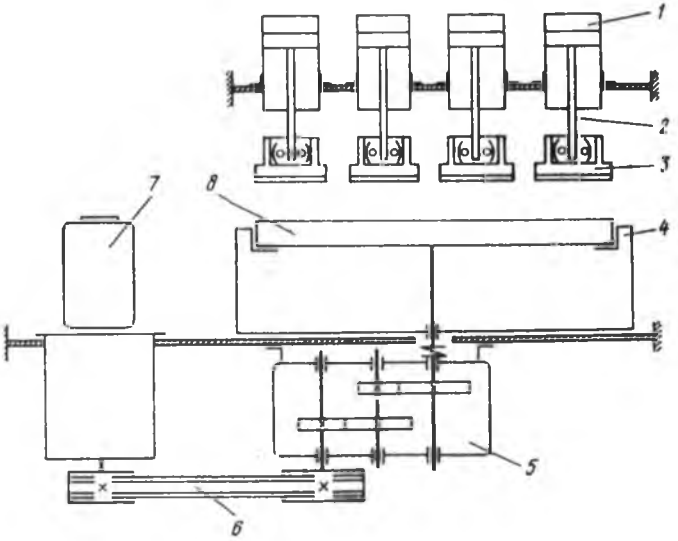


Рис. 62. Схема полуавтомата одностороннего полирования пластин

вращение с частотой 87±10 об/мин от электродвигателя *7* через клиноременную передачу *6* и двухступенчатый редуктор *5*.

На верхней части станины станка размещены четыре пневмоцилиндра *1*, на штоках *2* которых шарнирно закреплены прижимные диски *3*. Пневмоцилиндры осуществляют подъем, опускание и необходимый прижим пластин к полировальнику. Шарнирное крепление прижимных дисков с приклеенными к ним пластинами позволяет им плотно прилегать (самоустанавливаться) к полировальнику и вращаться вокруг собственных осей, обеспечивая сложное движение полируемых пластин. Станок позволяет обрабатывать пластины диаметром до 100 мм и обеспечивает получение шероховатости обработанной поверхности по четырнадцатому классу.

4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

После механической обработки кристаллическая решетка на поверхности полупроводниковых пластин разрушается, появляются трещины и риски в материале и различные загрязнения. Для удаления нарушенного поверхностного слоя полупроводникового материала применяют химическое травление, протекающее при контакте подложки с жидкой или газообразной средой.

Процесс химического травления — это химическая реакция жидкого травителя с материалом пластины с образованием растворимого соединения и последующим его удалением. В технологии полупроводникового производства обычно химическую обработку называют травлением, а химико-динамическую — полирующим травлением. Химическое травление полупроводниковых материалов проводят для того, чтобы удалить нарушенный слой. Оно характеризуется повышенной скоростью травления в местах нарушения кристаллической структуры. При химико-динамическом травлении удаляют более тонкие слои, т. к. его назначение — создать на пластине гладкую поверхность высокого класса чистоты. Состав травителя подбирают так, чтобы полностью подавить его способность к селективному травлению. Процессы химической обработки сильно зависят от температуры, концентрации и чистоты реактивов. Поэтому при проектировании оборудования для химической обработки стремятся стабилизировать основные параметры процесса и этим гарантировать высокое качество травления.

Материалы, применяемые для изготовления рабочих камер, должны быть стойкими к используемым реактивам, а применяемые средства автоматизации — либо малочувствительными (например, пневмо- или гидроавтоматика), либо хорошо защищенными от воздействия паров агрессивных реактивов (в случае применения электроавтоматики).

Установка для химического травления пластин типа ПВХО-ГК60-1 показана на рис. 63, а схема устройства рабочих органов приведена на рис. 64.

Рис. 63. Установка для химического травления пластин типа ПВХО-ГК60-1:
1—3 — ванны для обработки соответственно в кислотах, деионизованной воде, кистями

На рабочем столе в пылезащитной камере смонтированы три рабочих ванны *1—3*. В ванне *1* производится обработка кремниевых пластин погружением в холодные или горячие кислоты, или органические растворители. Крышка ванны в процессе обработки герметически закрыта. Обработка производится групповым методом в кассетах по 40—60 пластин в зависимости от их размеров. Из ванны *1* кассеты *6* переносятся в ванну *2* для отмывки деионизованной водой. Степень отмывки контролируется прибором по разности сопротивления деионизованной воды на входе и выходе ванны. После этого в ванне *3* пластины по 10 шт. обрабатываются кистями *4* и сушатся на центрифуге *5*.

Химико-динамическое, или полирующее травление производится с помощью устройства, схема которого приведена на рис. 65. Сущность его заключается в активном перемешивании травителя непосредственно у поверхности обрабатываемой пластины. Благодаря этому обеспечивается быстрое удаление продуктов реакции, равномерное поступление новых порций травителя, неизменность его состава и постоянство теплового режима обработки.

Во фторопластовый барабан *2*, вращающийся на оси, наклоненной относительно нормали на угол 15—45°, заливают порцию травителя *3*. Обрабатываемые пластины *4* наклеивают на фторо-

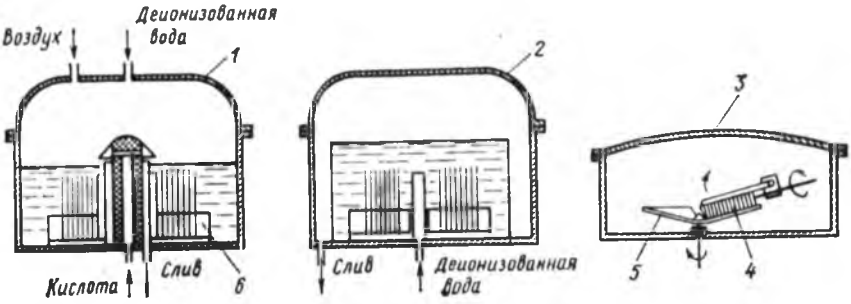


Рис. 64. Схема рабочих органов установки ПВХО-ГК60-1

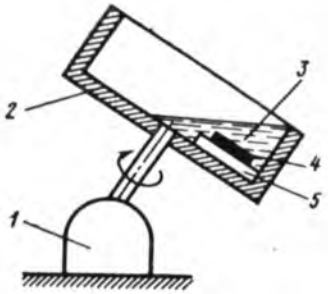


Рис. 65. Схема установки полирующего травления

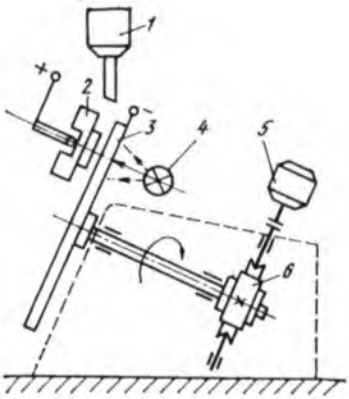


Рис. 66. Схема установки электрохимической полировки полупроводниковых пластин

пластовые диски *5*, которые помещают на дно барабана пластинами вверх. Барабан приводится во вращение от электродвигателя через редуктор *1* с частотой вращения 120 об/мин. При этом диски *5* перекатываются по его стенке, обеспечивая хорошее перемешивание травителя и создавая условия для равномерного травления.

Для полирования кремния применяют также электрохимическое полирование, в основе которого лежит анодное окисление полупроводника, сопровождаемое механическими воздействиями на окисную пленку. Принципиальная схема установки показана на рис. 66. Два дисковых электрода — анодный *2* и катодный *3* отделены друг от друга капроновой сеткой, натянутой с помощью кольца на катод *3*. Сетка пропитана электролитом, постоянно подаваемым из бачка *1*. Для изменения скорости протекания электролита угол отклонения катодного диска от вертикали может регулироваться от 0 до 20°. Электродвигатель *5* постоянного тока и редуктор *6* позволяют плавно изменять частоту вращения катодного диска *3* в пределах 80—200 об/мин. Катодный диск изготовлен из коррозионно-стойкой стали и имеет радиальные пазы, через которые пластины *n*-типа подсвечиваются мощной лампой *4* для генерации неосновных носителей (дырок), необходимых для протекания реакции. Анодный диск *2* с наклеенной на нем пластиной в процессе работы самоустанавливается по катодному диску. Данный метод обработки особенно эффективен при локальном травлении кремния.

5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

Качество поверхности обработанных пластин определяется шероховатостью и глубиной нарушенного слоя. После резки,

шлифовки и полировки пластины отмывают. Состояние поверхности пластин контролируют визуально или под микроскопом. При этом проверяют наличие на поверхности царапин, рисок, сколов, загрязнений и следов воздействия химически активных веществ.

Во всех установках контроль осуществляется оператором с использованием, например, микроскопов типов МБС-1, МБС-2 (с увеличением 88×) или МИМ-7 (с увеличением 1440×). Микроскоп МБС-1 благодаря специальному устройству осветителя позволяет наблюдать поверхность в лучах света, падающих под разными углами. На микроскопе МИМ-7 можно наблюдать поверхность в светлом и темном полях. Оба микроскопа позволяют измерять размеры повреждения поверхности специально установленными окулярами. В установках для визуального контроля пластин автоматизируется подача пластин из кассеты на предметный столик под микроскоп и возвращение ее после контроля в соответствующую классификационную кассету. Иногда вместо оптического микроскопа применяют проекторы, позволяющие снизить утомляемость оператора.

Шероховатость поверхности в соответствии с ГОСТ 2789—73 оценивают средним арифметическим отклонением профиля *Ra* или высотой микронеровностей *Rz*. ГОСТ устанавливает 14 классов шероховатости поверхности. Для 6—12 классов шероховатости основной является шкала *Ra*, а для 1—5-го и 13—14-го — шкала *Rz*. Шероховатость измеряют в визуально определенном направлении, соответствующем наибольшим значениям *Ra* и *Rz*.

Для измерений используют стандартные профилографы-профилометры или с помощью сравнительного микроскопа поверхность обработанной пластины визуально сравнивают с эталоном. Современный профилограф-профилометр — универсальный высокочувствительный электромеханический ощупывающий прибор, предназначенный для измерения волнистости и шероховатости металлических и неметаллических поверхностей. Принцип действия прибора состоит в том, что колебательные движения ощупывающей иглы с радиусом закругления 10 мкм вызывают изменения напряжения, которые регистрируются отсчетным устройством. Прибор имеет также записывающий механизм и может выдавать профилограмму поверхности. Для бесконтактного измерения применяют микроинтерферометры МИИ-4 и МИИ-11 с пределами измерений $Rz=0{,}005—1$ мкм.

Толщина слоя, в котором в результате механической обработки нарушена кристаллическая решетка полупроводника, является одним из критериев качества обработанной поверхности пластины. Толщина нарушенного слоя зависит от размера зерна абразивного порошка, примененного для обработки, и приближенно может быть определена по формуле

$$H = K\delta,$$

где δ — размер зерна; K — эмпирический коэффициент ($K=1{,}7$ для Si; $K=2{,}2$ для Ge).

Структура нарушенного слоя имеет зоны нарушенного рельефного и трещиноватого слоев (последняя самая большая) и зону упругих деформаций. Под ними расположен неповрежденный монокристаллический материал.

Толщину нарушенного слоя определяют только в процессе отладки технологии механической обработки пластин. Наиболее простым и удобным методом определения толщины нарушенного слоя является визуальный контроль под микроскопом поверхности после селективного травления. Существуют и другие методы.

После определения толщины нарушенного слоя и назначения припусков на обработку стремятся создать и поддерживать такой технологический процесс изготовления полупроводниковых пластин, который гарантировал бы удаление дефектов, возникающих при механической обработке. Поэтому в установившемся производственном процессе толщину нарушенного слоя не контролируют.

Для контроля толщины, неплоскостности, непараллельности и прогиба пластин используют стандартные измерительные средства, такие, как индикаторы часового типа или другие аналогичные им рычажно-механические приборы с ценой деления 0,001 мм. В последнее время для контроля геометрических параметров пластин все чаще начинают применять бесконтактные пневматические или емкостные датчики. С их помощью можно быстро производить измерения, не подвергая пластину риску загрязнения или механического повреждения.

ГЛАВА 7

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем важное место занимает технологическое оборудование для проведения операций очистки. В условиях производства пластины с приборами соприкасаются с различными средами, и полностью защитить их от адсорбции примесей и получить идеально чистую поверхность практически невозможно. Поэтому применяемое понятие «чистая поверхность имеет относительный характер.

Технологически чистой считается поверхность, концентрация примесей на которой не препятствует воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров полупроводниковых приборов и интегральных схем. В связи с этим определением на различных этапах технологического процесса требуется различная степень очистки пластин. Так, например, на промежуточных стадиях изготовления пластин очистку их поверхности производят частично, стремясь:

удалить механические частицы более крупные, чем частицы абразива, применяемого на последующей операции;

подготовить поверхность пластин к проведению таких чувствительных к загрязнениям операций, как химическое травление и химико-механическое полирование;

удалить загрязнения, которые могут повлиять на точность контроля пластины.

Очистка в полном объеме производится только после конечной операции механической обработки. Для очистки поверхностей полупроводниковых пластин и кристаллов технологический процесс должен состоять из последовательных операций, каждая из которых предназначена для удаления одного или нескольких видов загрязнений. Источниками загрязнений могут быть смазки, смазочно-охлаждающие жидкости, абразивные частицы, пыль, остатки щелочей, кислот и солей, а также различные газы. Механизм очистки подложек достаточно прост, однако многообразие электрофизических состояний поверхности и недостаточная достоверность оценки степени чистоты определяют существование большого числа вариаций технологических процессов очистки.

Процесс полной очистки поверхности включает следующие три группы технологических операций: обезжиривание, травление и отмывку.

Обезжиривание — растворение (или разрушение) и удаление с поверхности жировых, масляных пленок и других загрязнений, химически не связанных с материалом поверхности.

Обезжиривание проводят в горячих или кипящих органических растворителях, таких, как бензин, сольвент, скипидар, бензол, толуол, ксилол метиловый, этиловый и пропиловый спирты, четыреххлористый углерод, дихлорэтан, трихлорэтан и др. Большинство из них легко воспламеняются, образуют с воздухом взрывоопасные смеси, или оказывают вредное действие на организм человека. Поэтому относиться к органическим растворителям следует с большой осторожностью, а процессы проводить в герметичных реакционных камерах с вытяжной вентиляцией. При выполнении этой операции происходит удаление загрязнений без нарушения структуры поверхности.

Травление — растворение загрязнений, образующихся в результате химического взаимодействия материала поверхности с окружающей средой, при этом происходит удаление загрязнений и поверхностного слоя очищаемого материала. Травители содержат вещество, являющееся окислителем, и вещество, которое является растворителем образующихся окислов. В качестве травителей для кремния используют кислотные и щелочные составы. Кислотные травители представляют собой смеси из азотной, плавиковой и уксусной кислот.

Так, например, для полирующего травления, дающего зеркальную поверхность кремния, используют смесь азотной и плавиковой кислот в соотношении 3:1 с температурой 30—40 °С. Время травления порядка 15 с. При добавлении в этот состав для замедления реакции 9 частей уксусной кислоты получают травитель, применяемый для химической обработки пластин кремния с любой кристаллографической ориентацией. Температура травления не должна превышать 25 °С, а время обработки возрастает до нескольких минут.

Щелочные травители представляют собой растворы NaOH или KOH с концентрацией от 1 до 30 % в зависимости от необходимой скорости травления при температуре раствора 50—100 °С. Обработанная поверхность при этом получается шероховатой.

Отмывка — растворение в деионизованной воде остатков реагентов, используемых при обезжиривании и травлении.

В полупроводниковом производстве для целей отмывки применяют воду двух марок: воду А для промывки пластин и кристаллов с p — n-переходами и воду Б для обработки всех других элементов полупроводниковых приборов. Вода А имеет удельное сопротивление от 7 до 20 МОм·см, а вода Б — не менее 1 МОм·см при температуре 20 °С.

Отмывку производят до тех пор, пока удельное сопротивление воды на выходе из промывочной ванны не сравняется с удельным сопротивлением ее на входе. Это служит критерием хорошей отмывки. Существуют и другие способы контроля качества отмывки, например, по краевому углу смачивания поверхности подлож-

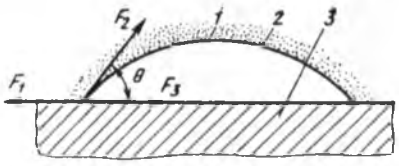


Рис. 67. Силы, действующие на каплю жидкости:
1 — газовая фаза; *2* — жидкость; *3* — подложка

ки. На подложку с помощью дозатора наносится капля жидкости. Она в зависимости от наличия загрязнений по-разному растекается по ее поверхности (рис. 67). Измеряя угол θ, проектируя подложку с каплей на экран, количественно оценивают степень очистки. Исходя из условия равновесия сил поверхностного натяжения на границах раздела можно написать

$$F_1 = F_3 + F_2 \cos\theta.$$

При очень чистой поверхности жидкость хорошо ее смачивает и растекается по большой площади. При этом угол θ невелик. Обычно считают отмывку хорошей, если $\theta < 75°$.

В технологию очистки подложек часто входит ряд однотипных физических и физико-химических процессов или способов обработки, поэтому иногда различные операции очистки проводят в одних и тех же аналогичных по принципу действия установках с изменением режимов обработки и рабочих реагентов.

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ОЧИСТКИ

Промышленные установки, используемые для целей обезжиривания, травления и отмывки, отличаются разнообразием используемых способов обработки.

Структурная схема любой технологической установки, предназначенной для очистки, состоит в общем случае из следующих частей и узлов:

рабочая камера или реактор, в котором проводится процесс очистки;

рабочий инструмент или устройство, реализующее технологический процесс или интенсифицирующее его;

приводные устройства, обеспечивающие необходимые механические перемещения в камере обрабатываемого объекта, рабочего инструмента или реагента и других элементов конструкции камеры;

пылезащитная камера, обеспечивающая выполнение требований технологической гигиены;

система подготовки и подачи рабочих реагентов;

электрические блоки питания и управления;

стол (каркас), служащий для монтажа узлов установки;

устройство загрузки — выгрузки объектов обработки;

датчики и приборы измерения и контроля технологических параметров, а также датчики автоматического управления.

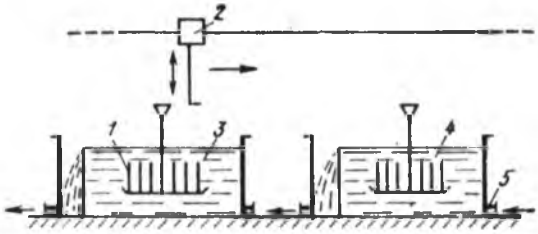


Рис. 68. Схема двухкамерной противоточной установки травления

По конструктивному признаку, т. е. в зависимости от структурной схемы и устройства, оборудование для очистки можно разделить на установки и агрегаты.

Установки — машины с одной или несколькими камерами, рассчитанные на применение определенного способа обработки или способа интенсификации процесса. Операцию очистки в этом случае проводят, как правило, в один этап.

Схема двухкамерной противоточной установки травления показана на рис. 68. Изделия *1* устройством для перемещения кассет *2* переносятся из ванны *3* в ванну *4*. Реагент подается через патрубок *5* навстречу обрабатываемым изделиям.

Агрегаты — машины с несколькими камерами, рассчитанными на последовательное или последовательно-параллельное проведение очистки в несколько этапов, отличающихся устройством и способом обработки (рис. 69).

Структурная схема агрегатов может включать несколько камер, выполненных в виде одинаковых модулей и рассчитанных на последовательно-параллельное проведение в них операций, для достижения большей производительности.

Классификация технологического оборудования очистки может быть проведена и по другим признакам. Например, по способу организации процесса очистки установки и агрегаты делят на машины периодического и непрерывного действия.

Непрерывные процессы осуществляются в проточных камерах и реакторах, в которые одновременно и непрерывно происходит подача рабочих реагентов и загрузка — выгрузка объектов обработки.

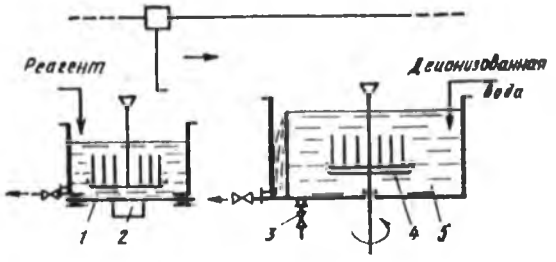


Рис. 69. Схема агрегата очистки:

1 — камера ультразвукового (УЗ) обезжиривания; *2* — УЗ-излучатель; *3* — сливной вентиль; *4* — центрифуга; *5* — камера отмывки

Основные преимущества оборудования непрерывного действия:

снижение, как правило, эксплуатационных расходов не только из-за более высокого уровня автоматизации, но и благодаря естественному увеличению полезного времени работы, т. е. повышению производительности установки за счет значительного снижения затрат времени на загрузку и выгрузку (цикловых потерь);

большая устойчивость технологических параметров и соответственно более стабильное качество обработки.

Несмотря на достоинство непрерывных процессов, в промышленности широко используют оборудование периодического действия, так как часто осуществление процесса в периодическом цикле более выгодно. Это в первую очередь связано со специфическим и относительно малым объемом обработки (даже на предприятиях с массовым выпуском изделий), определяемым большой номенклатурой выпускаемой продукции, требующей частой перенастройки оборудования. Процессы периодического действия позволяют достичь большей гибкости в использовании оборудования при меньших капитальных затратах.

Процессы очистки можно осуществлять по прямоточному или противоточному принципу. При организации процесса травления по принципу прямотока направления перемещения подложек и движения раствора травителя последовательно из одной камеры в другую совпадают, при этом концентрация активного реагента уменьшается от камеры к камере в направлении его движения. В противоточном процессе обрабатываемые пластины и поток травителя направлены навстречу друг другу. При этом, как правило, достигается лучшее распределение концентрации реагента по камерам: средняя скорость травления выше, чем в прямоточном процессе. Эффективность очистки при противотоке также выше за счет того, что подложки на выходе из последней стадии обработки контактируют с чистым реагентом. Поэтому применение противотока в оборудовании очистки предпочтительнее.

Не рассматривая общих требований, предъявляемых к любому виду оборудования производства интегральных микросхем, отметим только те из них, которые необходимо соблюдать при проектировании оборудования для очистки. К этим требованиям можно отнести:

высокую эффективность очистки;

недопустимость утечки рабочих реагентов, обладающих токсичными, огне- и взрывоопасными свойствами, высокой реакционной способностью;

оснащение вытяжной вентиляцией, обеспечивающей соблюдение санитарных норм СН-245-71, устанавливающих предельно допустимые концентрации токсичных веществ в рабочей зоне;

обеспечение установок системой сигнализации и надежно функционирующими защитными устройствами;

правильный выбор типа пылезащитной камеры в соответствии с требуемыми условиями проведения операции;

снижение уровня загрязнений, генерируемых собственными механизмами и процессами установки;

правильный выбор и расчет коррозионной стойкости материалов элементов конструкций, контактирующих с агрессивными средами;

обеспечение установок системами регенерации, утилизации отработанных реагентов, когда это экономически оправдано или необходимо для защиты окружающей среды.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ

Любая технологическая установка для очистки полупроводниковых изделий состоит из ряда однотипных функциональных узлов, важнейшими из которых являются рабочая камера, или реактор, в котором проходит процесс очистки, а также рабочий инструмент и устройства, реализующие этот процесс или интенсифицирующие его.

Простейшим реактором является ванна, в которую вручную или механизмом погружается кассета с обрабатываемыми изделиями. А простейшим инструментом является находящийся в ней химический реактив.

При ступенчатой очистке изделия или подложки проходят очистку последовательно в различных ваннах. Транспортировка осуществляется в кассетах, технологических приспособлениях вручную или транспортерами (рис. 70, *а*).

Рабочий реактив подается насосами через фильтровально-регенерационную систему или периодически меняется. При непрерывной очистке изделия (например, подложки в кассетах) перемещаются транспортером в одной и той же ванне, в различных зонах которой производится очистка. Рабочий реактив подается навстречу движению и пропускается через фильтровально-регенерационную систему (рис. 70, *б*).

В таких машинах в качестве инструмента, улучшающего и интенсифицирующего процесс очистки, часто используют излучатели ультразвуковых (УЗ) колебаний пьезокерамического или магнитострикционного типа.

Крепление УЗ-излучателей магнитострикционного типа к стенкам рабочей ванны осуществляется болтовыми соединениями с использованием соответствующих уплотнителей.

В последнее время широкое применение для очистки нашли вращающиеся столы или центрифуги с размещенными на них пластинами, обрабатываемыми при помощи различного рода щеток или форсунок, распыляющих реагент под большим давлением. Центрифуги нашли применение для выполнения многих финишных операций химической очистки поверхностей. С их помощью осуществляются в автоматическом режиме такие операции, как струйная промывка, проявление и травление диспергированными растворами, удаление микрочастиц с поверхности обрабатывае-

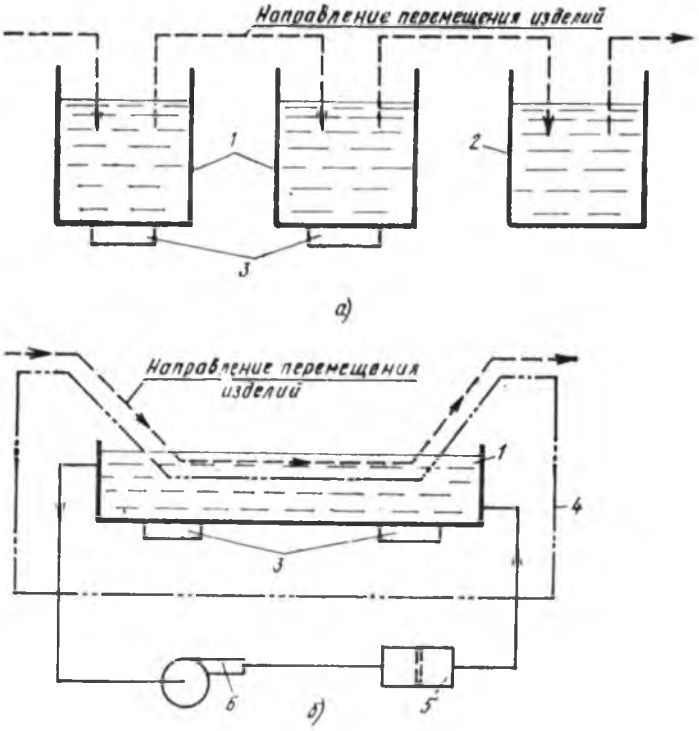


Рис. 70. Схемы УЗ-очистки:
а — ступенчатым способом; *б* — непрерывным способом; *1* — УЗ-ванны; *2* — ванна отмывки; *3* — УЗ-излучатели; *4* — транспортер; *5* — фильтр; *6* — насос

мых изделий и сушка способом центрифугирования. При этом обрабатываемые изделия, как правило, размещают на вращающемся столе горизонтально или под некоторым углом к горизонту. Во многих случаях одна центрифуга предназначается для выполнения нескольких операций.

Основными конструктивными элементами центрифуг являются привод вращения, узлы крепления пластин на столе и обработки поверхности изделий.

Привод от электродвигателя наиболее часто применяют в центрифугах, предназначенных для выполнения последовательных операций химической обработки и сушки центрифугированием. При этом применяют электродвигатель постоянного тока *4* (рис. 71, *а*) с сельсином *3*, позволяющим плавно регулировать частоту вращения центрифуги и диапазоне 25—200 об/мин при химической обработке или доводить ее до $4 \cdot 10^3$ об/мин при сушке. Плавное регулирование частоты вращения необходимо для подбора оптимального режима обработки.

Объединение электродвигателя переменного тока *5* (рис. 71, *б*) с планетарным редуктором *3* дает возможность вращать центри-

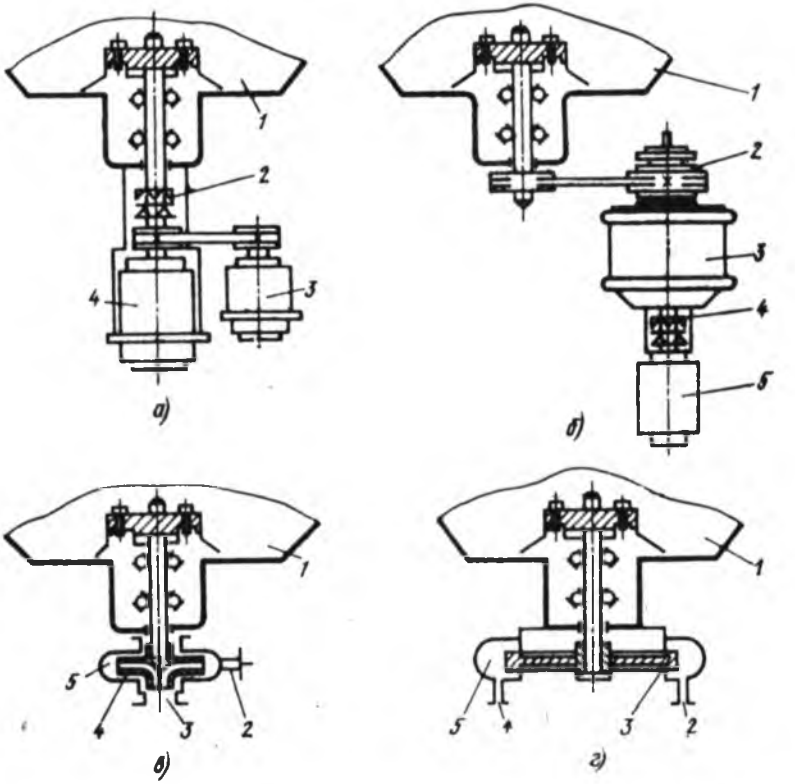


Рис. 71. Приводы вращения предметного стола центрифуг:
а — с электродвигателем постоянного тока: *1* — камера; *2* — упругая муфта; *3* — сельсин; *4* — электродвигатель постоянного тока:
б — с электродвигателем переменного тока:
1 — камера; *2* — электромагнитная муфта; *3* — планетарный редуктор; *4* — упругая муфта; *5* — электродвигатель переменного тока;
в — с гидроприводом:
1 — камера; *2* — выходной канал; *3* — входной канал; *4* — крыльчатка гидротурбины; *5* — корпус гидропривода;
г — с пневмоприводом:
1 — камера; *2* — входной канал; *3* — крыльчатка пневмотурбины; *4* — выходной канал; *5* — корпус пневмопривода

фугу при химической обработке с частотой 25—50 об/мин, а при сушке центрифугированием за счет включения электромагнитной муфты *2* достигать частоты вращения $3 \cdot 10^3$ об/мин.

В гидродвигателях струя жидкости под давлением подается к гидротурбине (рис. 71, *в*) или непосредственно к поверхности центрифуги. В последнем случае в качестве рабочей жидкости используют сам реактив, который, ударяясь в стенку гнезда центрифуги, омывает обрабатываемую пластину и вращает центрифугу относительно центральной трубки. Недостатком этого устройства является значительный расход реактива и трудность получения

большого числа оборотов, необходимых для сушки пластин центрифугированием.

Привод от пневмотурбины можно применять при установке вала центрифуги как на обычных подшипниках качения (рис. 71, *г*), так и на воздушных. В последнем случае подаваемый под давлением газ позволяет надежно защитить привод от воздействия реактивов, однако воздействие струи газа на распыляемые реактивы может снизить гидродинамический эффект на поверхности обрабатываемых пластин.

Узлы крепления при односторонней обработке пластин *2* выполняют в виде вакуумных присосов *1* (рис. 72, *а*), установленных на центрифуге *3*, внутренняя полость которой соединена с вакуумной системой. В этом случае необрабатываемая сторона пластин надежно защищается от подтеков реактивов.

Для случаев, когда нет необходимости в защите обратной стороны пластин, применяют подвижные прижимы, способные закрепить пластины различной формы и размеров (рис. 72, *б*). Под действием центробежных сил эти прижимы поджимают пластины к неподвижным упорам центрифуги. При выполнении в столе сквозных отверстий подвижные прижимы будут контактировать лишь

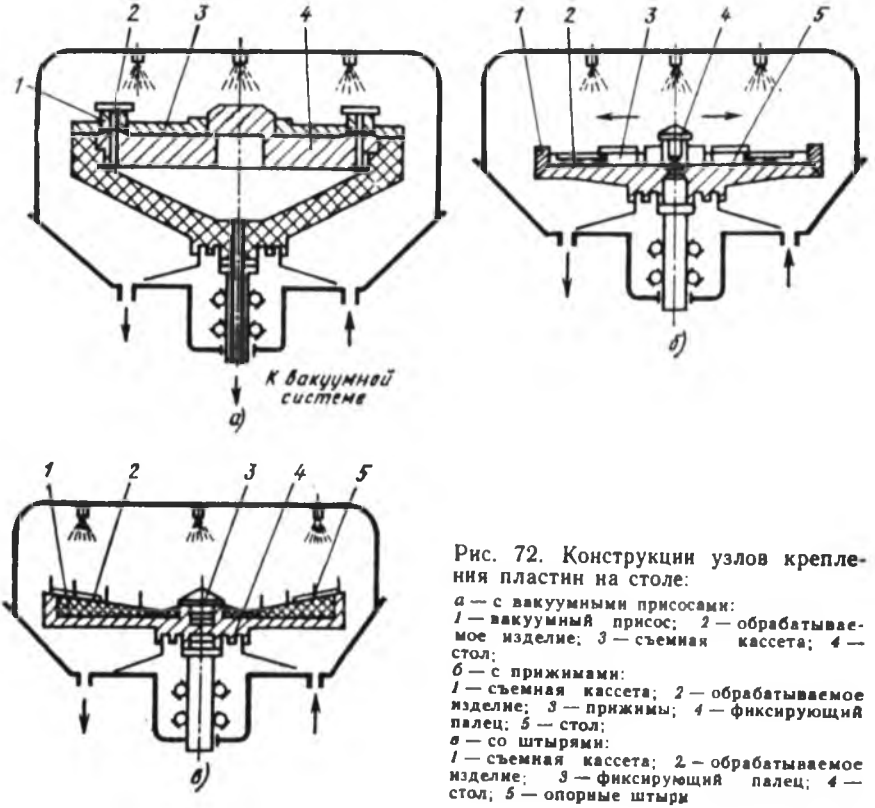


Рис. 72. Конструкции узлов крепления пластин на столе:

а — с вакуумными присосами:
1 — вакуумный присос; *2* — обрабатываемое изделие; *3* — съемная кассета; *4* — стол;
б — с прижимами:
1 — съемная кассета; *2* — обрабатываемое изделие; *3* — прижимы; *4* — фиксирующий палец; *5* — стол;
в — со штырями:
1 — съемная кассета; *2* — обрабатываемое изделие; *3* — фиксирующий палец; *4* — стол; *5* — опорные штыри

с ребрами закрепляемых пластин, что позволит вести их двустороннюю обработку.

Выполнение опорных гнезд на столе центрифуги с наклоном к горизонтальной плоскости обеспечивает поджим пластин к плоскости стола и упорам за счет центробежных сил, действующих на пластины при вращении центрифуги. При этом на столах центрифуг могут устанавливаться кассеты *1*, упорные штыри *5* которых совместно со штырями столов образуют гнезда для пластин (рис. 72, *в*). Применение в последнем случае съемных кассет облегчает групповую загрузку и выгрузку пластин.

В узлах обработки большинства известных конструкций центрифуг применяются форсунки, подающие распыленную струю ре-

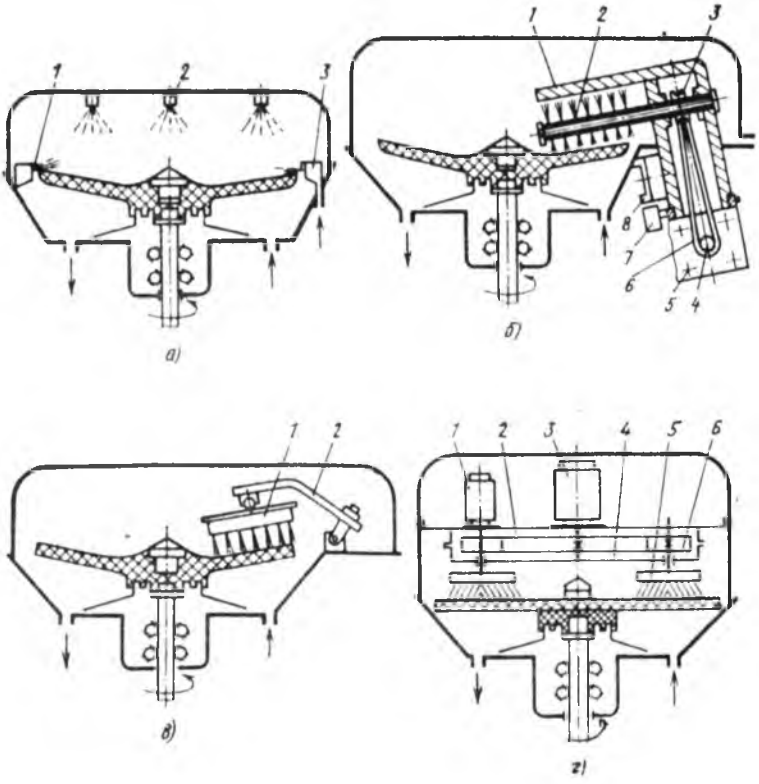


Рис. 73. Конструкции узлов обработки изделий:

а — струей жидкости:
1 — форсунка подачи деионизованной воды; *2* — форсунка для химобработки изделия; *3* — коллектор;
б — цилиндрическими щетками:
1 — коллектор; *2* — цилиндрическая щетка; *3*, *4* — шкивы; *5* — электродвигатель вращения щетки; *6* — приводной ремень; *7* — реечная передача; *8* — электродвигатель отвода щетки;
в — плоскими щетками:
1 — плоская щетка; *2* — кронштейн;
г — вращающимися щетками;
1 — электродвигатель вращения щетки; *2* — центральная шестерня; *3* — электродвигатель отвода щеток; *4* — водило; *5* — щетка; *6* — шестерня

актива или деионизованной воды к обрабатываемым пластинам (рис. 73, *а*); возможно также применение специальных штуцеров для подачи инертного газа, ускоряющего сушку пластин.

Для интенсификации удаления с поверхности пластин загрязнений используют щетки различных типов: вращающиеся цилиндрические (капроновые или колонковые) (рис. 73, *б*), неподвижные плоские капроновые (рис. 73, *в*), торцевые колонковые, совершающие планетарное движение по поверхности обрабатываемых пластин (рис. 73, *г*).

Комбинируя в различных сочетаниях типы приводов для вращения стола, конструкции узлов крепления пластин, а также конструкции узлов гидромеханического воздействия, можно получить машины различного назначения.

Наибольшее применение в отечественной практике и за рубежом нашли центрифуги с узлами обработки в виде форсунок, применяемые для отмывки поверхности пластин с последующей промывкой и сушкой центрифугированием, а также центрифуги с вращающимися цилиндрическими щетками. В последнем случае после очистки и промывки поверхностей пластин щетки отводятся, позволяя осуществить сушку центрифугированием.

4. СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ

Интенсификация процессов очистки поверхности имеет целью не только увеличение скорости процесса (повышение производительности установок), но и получение более качественной очистки. Очистка поверхности в жидком реагенте основана на гетерогенных физико-химических процессах растворения и зависит от рода удаляемого вещества, природы растворителя, температуры и скорости обтекания поверхности реагентом.

Для подогрева агрессивных жидкостей применяют нагреватели проточного или объемного (нагревающего порцию реагента) типа, выполненные из материала, не вступающего в реакцию с реагентом (фторопласт, кварц, коррозионно-стойкая сталь).

Нагрев осуществляют при помощи ламп инфракрасного излучения или нагревателей типа ТЭН через промежуточную жидкую или газообразную среду. Проточный нагреватель с промежуточной воздушной средой и инфракрасной нагревательной лампой показан на рис. 74.

Жидкость поступает через входной патрубок *8*, проходя по спиральной трубке *6*, она подогревается за счет излучения лампы *7* и выходит через патрубок *9*. Для увеличения скорости обтекания очищаемой поверхности реагентом применяют вибрационную обработку с промышленной (50 Гц) или ультразвуковой частотой, а также механическое или пневматическое перемешивание реагента и струйную очистку.

Вибрацию с частотой 50 Гц для интенсификации процесса используют в полуавтоматических установках типа ПВХО-ПК60-1 и ПВХО-ГК60-1. На них можно проводить операции травления,

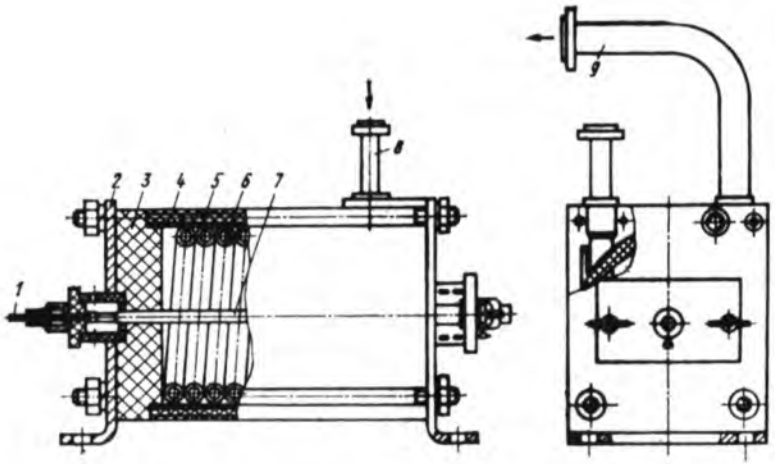


Рис. 74. Проточный нагреватель с промежуточной воздушной средой:
1 — токоподвод; *2* — стойка; *3* — фланец; *4* — изоляционный цилиндр; *5* — изолятор; *6* — трубка с нагреваемой жидкостью; *7* — нагревательная лампа; *8* — входной патрубок; *9* — выходной патрубок

обезжиривания, снятия фоторезиста и др. Обработку проводят в объеме холодных или нагретых кислот и органических растворителей с последующей промывкой деионизованной водой, кистевой мойкой и сушкой на центрифуге.

Для ультразвуковой вибрационной обработки в установках кроме специально разрабатываемых ультразвуковых ванн используют и серийно выпускаемые отечественной промышленностью универсальные, настольные малогабаритные ультразвуковые ванны УЗВ-0,1, УЗВ-0,25, не требующие принудительного охлаждения, и др. Различаются они количеством встроенных УЗ-излучателей, числом камер и их размерами. Рабочие камеры выполнены из коррозионно-стойкой стали. В дно камеры вмонтирован пьезоэлектрический излучатель типа ПП2-0,1/18.

Пьезоэлектрические излучатели на основе синтетической керамики титаната бария или цирконат-титаната свинца (ЦТС) получили широкое распространение. Достоинство этих материалов — воможность изготовления излучателей плоской, цилиндрической или сферической формы и практически любых размеров. Недостатком являются большие механические и диэлектрические потери, что приводит к перегреву и резкому снижению интенсивности колебаний при температуре более 90 °С. Поэтому с пьезоэлектрических преобразователей или излучателей из титаната бария при непрерывном излучении в какую-либо среду без их охлаждения можно получить максимальную удельную интенсивность колебаний до 2—5 Вт/см^2, что, однако, вполне достаточно для очистки полупроводниковых приборов.

Излучатели из пьезокерамики имеют пьезомодуль почти на два порядка больший, чем у кварца, т. е. величину деформации

в зависимости от приложенного напряжения и требуют для возбуждения на порядок меньшего напряжения (100—300 В).

Плоские излучатели выполняют в виде пластин *1* (рис. 75, *а*) из пьезокерамики, наклеенных на металлическую подложку *2*. Толщину керамической пластины выбирают кратной четверти длины УЗ-волны. На практике используют полуволновые, четвертьволновые и многослойные излучатели. Из условия резонанса толщина пьезокерамической пластины полуволнового преобразователя

$$h = \lambda_к/2 = \omega_{эк}/(2\nu_р);$$

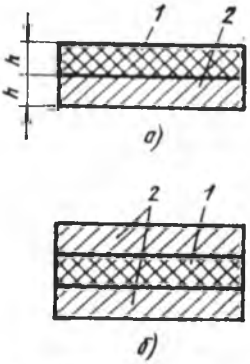


Рис. 75. Пьезоэлектрические излучатели

для четвертьволнового преобразователя

$$h = \lambda_к/4 = \omega_{эк}/(4\nu_р),$$

а для металлической накладки

$$h_н = \lambda_м/4 = \omega_{эм}/(4\nu_р),$$

где $\lambda_к$ и $\omega_{эк}$ — соответственно длина волны и скорость звука в керамике; $\lambda_м$ и $\omega_{эм}$ — соответственно длина волны и скорость звука в металлической накладке; $\nu_р$ — резонансная частота.

Пьезоэлектрический излучатель (рис. 75, *б*), с обеих сторон которого расположены металлические пластины *2*, называют сложным, или многослойным. Металлические пластины являются электродами излучателя. Сложный излучатель может состоять из одной или нескольких пьезопластинок.

Резонансная частота сложного излучателя определяется не только толщиной керамической пластинки, а общей толщиной пакета с накладками. В многослойных излучателях верхнюю накладку выполняют из алюминия, а нижнюю — из стали. Так как акустическое сопротивление алюминия в три раза меньше, чем у стали, то амплитуда колебаний на поверхности алюминиевой накладки в три раза больше.

Магнитострикционные излучатели бывают двух типов: стержневые и плоские. Стержневые излучатели выполняют из стандартных никелевых трубок. При работе трубка сильно нагревается вихревыми токами. Поэтому ее разрезают по образующей и охлаждают, используя для этого водяные рубашки. Более просты по конструкции и надежны в работе плоские излучатели, представляющие собой пакеты из вырубленных плоских листов магнитострикционного материала (железа, никеля, кобальта и их сплавов). В пакете плоского излучателя (рис. 76) различают стержни *1*, окно *2* и ярмо *3*, соединяющее стержни. Магнитострикторы, как правило, используют для одностороннего излучения. Для этого на торец магнитострикторa, противоположный из-

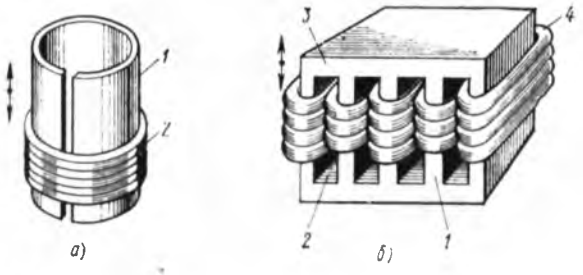


Рис. 76. Типы магнитострикционных излучателей:
а — стержневой (*1* — трубка; *2* — обмотка); *б* — плоский (*1* — стержень; *2* — окно; *3* — ярмо; *4* — обмотка)

лучающему, наклеивают пористую резину. Колебания, отражаясь от этого торца, изменяют фазу на 180° и достигают излучающей поверхности в фазе с прямой волной. В магнитострикторе нагреваются как обмотка, так и пакет. Для сохранения нормальных условий работы температура в центральной части вибратора не должна превышать 75 °С. Поэтому магнитострикторы заключают в герметичный бачок с принудительным охлаждением водой, а обмотку *4* выполняют из специального провода типа БПВЛ.

Из практики известно, что с увеличением удельной мощности свыше 0,4 Вт/см² степень очистки изменяется незначительно. Поэтому для очистки подложек и изделий полупроводникового производства можно рекомендовать установки, обеспечивающие интенсивность УЗ-колебаний в диапазоне 0,4—0,5 Вт/см².

В последнее время стали применять УЗ-колебания с частотой около 400 кГц.

Использование таких колебаний вызвано следующими положительными факторами:

более качественной очисткой мелких отверстий, щелей и т. п. за счет уменьшения длины волны;

увеличением расстояния эффективного воздействия УЗ-колебаний;

уменьшением габаритных размеров и массы УЗ-генераторов и преобразователей.

В технологии изготовления микросхем перемешивание жидких реагентов можно осуществлять устройствами с твердым рабочим органом — механическими мешалками или с газообразным рабочим органом (сжатый воздух, азот и др.) — барботерами. Выбор этих устройств определяется характеристиками перемешиваемой среды, в основном вязкостью.

Необходимо помнить, что понятие «скорость перемешивания» неэквивалентна понятию «скорость обтекания». Так, при перемешивании мешалкой растворителя вблизи растворяемой твердой поверхности угловая скорость вращения мешалки значительно отличается от скорости движения жидкости относительно твердой

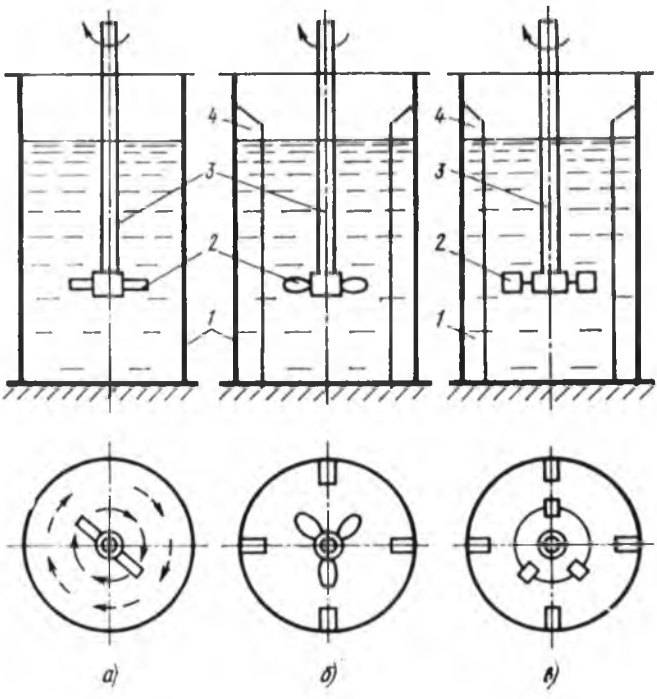


Рис. 77. Рабочие ванны с различными типами мешалок:
а — с лопастной; *б* — с пропеллерной; *в* — с турбинной;
1 — ванна; *2* — мешалка; *3* — приводной вал; *4* —отражательная перегородка

поверхности растворяемого тела (подложки). Скорость движения жидкости (обтекания) может на один-два порядка отличаться от угловой скорости вращения мешалки и мало зависеть от нее.

Эффективность перемешивания определяется затратами энергии, необходимыми для получения заданного технологического результата. Практика использования различных конструкций перемешивающих устройств показала, что для невязких сред можно успешно использовать лопастные, пропеллерные и турбинные мешалки (рис. 77). При вращении лопастей таких мешалок на поверхности жидкости образуется воронка, глубина которой определяется диаметром мешалки и частотой ее вращения. Нормальная работа мешалки соответствует условиям, при которых глубина воронки меньше глубины расположения лопастей мешалки. Для исключения образования воронки у стенок аппаратов с быстроходными мешалками устанавливают радиальные отражательные перегородки шириной примерно 0,1 диаметра сосуда.

Равномерность перемешивания возрастает по мере опускания мешалки в жидкость и достигает максимума, когда расстояние от мешалки до днища сосуда составляет соответственно 0,1—0,3 и

0,5—1 диаметра для лопастных и для пропеллерных и турбинных мешалок.

К числу первых перемешивающих устройств, примененных на практике, относятся лопастные мешалки (рис. 77, *а*), отличающиеся простотой конструкции и низкой стоимостью. Как правило, они имеют две лопатки, плоскость которых перпендикулярна плоскости днища (прямые лопатки) или расположены под углом (наклонные лопатки). В последнем случае интенсивность перемешивания значительно выше. Лопатки мешалки создают главным образом окружную циркуляцию жидкости при незначительной радиально-осевой циркуляции. Лопастные мешалки с высокими лопатками (высотой 0,8—1,2 их диаметра) называют листовыми. Такие мешалки используют для процессов растворения при линейных скоростях 1,5—4 м/с; они имеют низкую интенсивность перемешивания.

Совершенствование лопастных мешалок привело к разработке и широкому применению пропеллерных и турбинных мешалок. Пропеллерные мешалки, выполненные в виде корабельного винта (рис. 77, *б*), создают в аппарате интенсивную циркуляцию среды, что обусловлено возникновением насосного эффекта. Они отличаются от мешалок других типов малым расходом энергии. Частота вращения вала составляет 2—30 об/с. Преимуществом таких мешалок является возможность муфтового соединения вала мешалки с валом электродвигателя. Для исключения образования воронки кроме отражательных перегородок вал мешалки располагают эксцентрично или устанавливают под некоторым углом к оси ванны. Для усиления осевой циркуляции пропеллер помещают в диффузор (циркуляционную трубу).

Турбинные мешалки (рис. 77, *в*) представляют собой один или два диска с укрепленными на них лопатками. Если лопатки заключены между дисками наподобие колеса центробежного насоса, то такую мешалку называют закрытой турбиной. Наиболее простыми и эффективными являются мешалки с прямыми лопатками, расположенными радиально в плоскости, перпендикулярной дну ванны. Мешалки с изогнутыми лопатками потребляют меньшую мощность.

При обработке поверхности распыленным реагентом (или в виде струй) интенсификации процесса очистки достигают увеличением скорости обтекания поверхности реагентом. На межфазной поверхности поддерживается постоянная концентрация реагента за счет непрерывной смены распыленного реагента и удаления с нее продуктов реакции. Немаловажное значение в интенсификации процесса имеет гидравлическое воздействие капель (струй) на поверхность, подобно тому, как действует гидромонитор.

Для распыления жидких реагентов используют разные типы распылительных форсунок (рис. 78). Наибольшее распространение нашли газовые (пневматические) форсунки.

Распыление жидкостей в пневматических форсунках (рис. 78, *а*) производится струей газа, движущегося с большой скоростью,

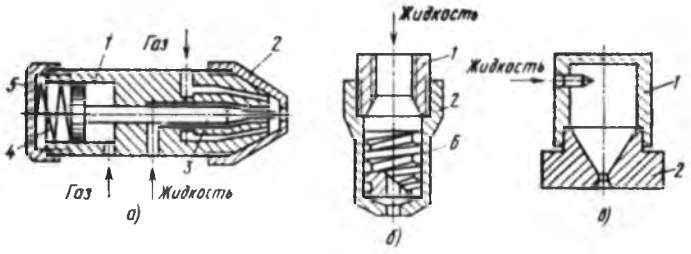


Рис. 78. Типы распылительных форсунок:
а — газовая (пневматическая); *б* — гидравлическая шнековая; *в* — гидравлическая центробежная;
1 — корпус; *2* — сопло; *3* — клапан; *4* — пружина; *5* — крышка; *6* — шнек

Жидкость подается в форсунку под давлением, самотеком или же засасывается благодаря инжекционному действию газовой струи. Контакт между жидкостью и газом может происходить как вне форсунки, так и внутри нее. Пневматические форсунки по сравнению с гидравлическими и механическими применяют для более вязких жидкостей, но они потребляют больше энергии. Чем значительней расход газа в расчете на единицу объема распыленной жидкости, тем меньше размер получаемых капель и равномерней распыление.

Гидравлический расчет форсунок сводится к определению размеров выходных сечений для газа и раствора по их заданным расходам.

5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОЧИСТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ, РАДИКАЛОВ И ИОНОВ

Сухая очистка, как правило, является финишной, так как выполняется непосредственно перед проведением последующих технологических процессов, например, перед нанесением пленок, оксидированием, фотолитографией.

Методы сухой очистки можно условно разделить на физические и химические. При физических методах загрязнения удаляют отжигом и ионным распылением (травлением). При химических методах загрязнения, находящиеся на поверхности, переводят в новые химические соединения, а затем удаляют. Очистку, сопровождаемую удалением поверхностного слоя подложки, принято называть травлением. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления показана на рис. 79.

Ионное травление — это процесс удаления загрязнений вместе с распыляемым в вакууме поверхностным слоем обрабатываемого материала. Его осуществляют в вакуумных установках. Для распыления поверхность подложек бомбардируют ускоренными положительными ионами инертных газов. Наиболее часто для распыления применяют аргон. Эффективность распыления и, следовательно, травления характеризуется коэффициентом распыления,

Рис. 79. Классификация процессов вакуумно-плазменного травления

который численно равен количеству атомов очищаемой подложки, распыленных одним бомбардирующим ионом.

Травление кремния выполняется при плотностях ионного тока свыше 10 А/м² и энергии ионов 1—10 кэВ. При очень больших энергиях ионы глубоко проникают в обрабатываемые подложки и распыления не наблюдается.

Для ионного травления используют системы двух типов, диодные и с автономными ионными источниками.

Диодные системы имеют реактор *3* (рис. 80) с двумя противолежащими дисковыми электродами *1* и *6*. На одном из электродов располагают обрабатываемые подложки *2*. При подаче на него отрицательного потенциала из плазмы вытягивают положительные ионы, которые ускоряются электрическим полем и бомбардируют поверхность подложек, очищая их. Для травления диэлектрических и плохопроводящих подложек на электрод-подложкодержатель *6* подают высокочастотное напряжение, которое, кроме ионной, обеспечивает электронную бомбардировку подложек, компенсирующую положительный заряд на их поверхности. Травление в диодных системах называют ионно-плазменным травлением.

Системы плазмохимического травления с автономными ионными источниками имеют вакуумную камеру *1* (рис. 81), в которой располагают очищаемые подложки *2* и газоразрядный источник *4* для формирования ионного луча с системой вытягивающих, ускоряющих и фокусирующих линз *5*, *9*. Луч направляют в сторону вращающегося наклонного столика *10*, на поверхности которого располагают подложки. Для компенсации положительного заряда, накопленного на обрабатываемых поверхностях, применяют нейтрализатор *3* — подогревный катод, эммитирующий электроны.

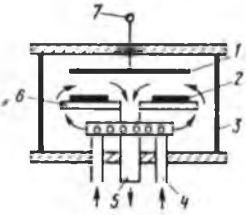


Рис. 80. Установка с реактором диодного типа и анодной связью:

1 и *6* — электроды; *2* — подложка; *3* — реактор; *4* — патрубок подвода реагента; *5* — патрубок откачной системы; *7* — токоподвод от ВЧ-генератора

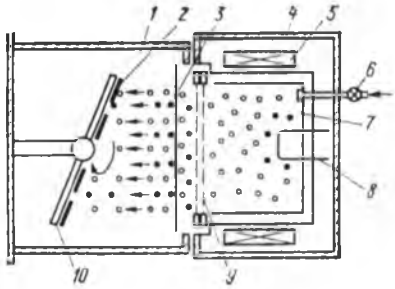


Рис. 81. Установка плазмохимического травления с автономным ионным источником:

1 — вакуумная камера; *2* — подложки; *3* — нейтрализатор; *4* — газоразрядный источник; *5* — магнит; *6* — натекатель; *7* — анод; *8* — катод; *9* — система линз; *10* — вращающийся столик

Ионное травление универсально. Можно очищать поверхность любых материалов от примесей любого типа. Ионное травление можно применять для обработки многослойных пленок с несовместимыми в условиях жидкостной химической очистки свойствами слоев. С помощью ионной очистки получают высокое качество без глубоких изменений в обрабатываемом поверхностном слое, высокую точность удаления слоев ($\pm 0{,}03$ мкм). При этом исключаются межоперационные затраты времени, так как последующие операции (оксидирование, осаждение пленок) можно проводить непосредственно в той же вакуумной камере. Травление в системах с ионными источниками называют ионно-лучевым травлением.

Ионно-химическое травление осуществляют в тех же установках, что и ионное травление, только в качестве рабочего газа используют не инертный, а химически активный газ. Отличие в оборудовании состоит в том, что в автономных ионных источниках этих установок нельзя применять накаливаемый катод, который взаимодействует с химически активной плазмой и быстро выходит из строя. В диодных системах в большинстве случаев используют для получения плазмы ВЧ-напряжение, которое обеспечивает стабильность разряда в химически активных газах.

Ионно-химическое травление сочетает достоинства ионного и плазмохимического травления. Механизм ионно-химического травления — совместное воздействие распыления и химической реакции. Преимущество ионно-химического перед плазмохимическим травлением в том, что возможно травление даже тех материалов, которые не образуют летучих соединений с радикалами.

Плазмохимическое травление проводят в установках, имеющих реакторы с объемным расположением подложек (рис. 82) и в реакторах диодного типа (рис. 80) при давлении газа, не позволяющем ионам достигнуть энергии, достаточной для распыления по-

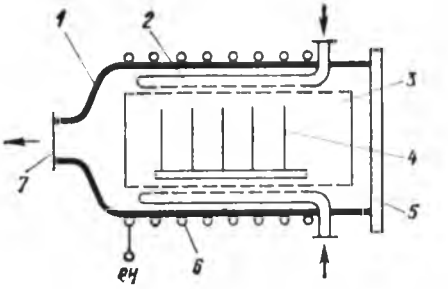


Рис. 82. Установка плазмохимического травления с объемным расположением подложек в реакторе:
1 — кварцевый реактор; *2* — коллектор для подачи газа; *3* — металлический перфорированный цилиндр; *4* — обрабатываемые подложки; *5* — крышка; *6* — индуктор; *7* — откачной патрубок;

верхности очищаемой подложки ($E_и < 1{,}6 \cdot 10^{-17}$ Дж). Рабочий газ подают в реактор, где его молекулы под действием электронов плазмы диссоциируют на химически активные частицы (радикалы и атомы). Радикалы и атомы вступают в химическую реакцию с поверхностными загрязнениями и образуют летучие соединения, которые удаляют из реактора откачной вакуумной системой. Существует два вида реакторов с объемным расположением подложек: с перфорированным металлическим экраном, предотвращающим попадание заряженных частиц на подложку, и без экрана. Экран улучшает равномерность очистки. Электронная и ионная бомбардировка ускоряют химическую реакцию на поверхности, т. е. процесс очистки.

Благодаря электрической активности газов с образованием реакционноспособных радикалов плазмохимическое травление можно проводить при существенно меньших температурах (100—300 °С) по сравнению с обычным газовым травлением и удалять такие загрязнения, которые не поддаются газовому травлению.

Газовое травление чаще всего используют в эпитаксиальных установках для очистки подложек перед выращиванием на них полупроводниковых слоев. Сущность процессов газового травления заключается в химическом взаимодействии материала подложек с газообразными веществами и образовании при этом легко удаляемых летучих соединений. Загрязнения в процессе газового травления удаляют вместе с поверхностным слоем подложек.

Газовым травлением получают более чистые поверхности по сравнению с жидкостным. Однако во многих случаях газовое травление не применяют из-за высоких температур обработки и необходимости использования особо чистых газов.

Реакторы и газовые системы оборудования для газового травления необходимо выполнять из химически и термостойких материалов. При этом должны быть герметичными, не иметь застойных зон, так как многие газы, применяемые для травления, токсичны и взрывоопасны. В газовых системах должна быть предусмотрена очистка рабочих газов и нейтрализация отходящих газов.

ГЛАВА 8

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДИФФУЗИИ И ОКИСЛЕНИЯ

1. ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ДИФФУЗИИ И ОКИСЛЕНИЯ

При производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем пластины из полупроводникового материала подвергают ряду высокотемпературных обработок, проводимых в диффузионной печи.

Окисление кремниевых пластин применяют для образования на поверхности подложки оксидного слоя (двуокиси кремния, нитрида кремния и др.), который используют для пассивации $p-n$-структур, маскирования поверхности полупроводника от диффузии примесей и для МОП-приборов и микросхем на их основе в качестве затворного окисла.

Термическое окисление проводят в проточной системе, пропуская через реактор увлажненный водяным паром кислород.

Окисел, выращенный в атмосфере чистого осушенного кислорода, имеет более совершенную структуру, но растет в 10—15 раз медленнее, чем в увлажненном, поэтому часто окисление осуществляют в три стадии — в осушенном кислороде, в увлажненном с целью ускорения процесса и наращивания толстой пленки и вновь в осушенном.

На процессах диффузии основано получение легированных слоев в полупроводниковых подложках, образование активных $p-n$-переходов, диодов, транзисторов, межэлементной изоляции, разделительных областей и т. д.

Диффузия — это обусловленный тепловым движением процесс переноса примесных атомов или атомов основного вещества в направлении убывания их концентрации. Она протекает в любом веществе независимо от его агрегатного состояния. Если атомы в веществе распределены неравномерно, т. е. существует градиент концентрации, то в нем возникает направленный поток диффундирующих атомов из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией атомов данного вещества. Аналогично этому направленный поток возникает и в случае возникновения градиента температуры в рассматриваемом веществе. В этом случае атомы из области с более высокой температурой (с более высокой энергией) диффундируют в область с более низкой температурой.

В производстве полупроводниковых приборов обычно используют процессы диффузии с градиентом концентрации при постоянной температуре подложки.

Термическая обработка полупроводниковых подложек в диффузионной печи производится следующим образом. Сначала печь выводят на заданный температурный режим. Время разогрева печи до максимальной температуры с установлением теплового режима составляет не менее 2,5 ч. Затем из камеры загрузки печи, продуваемой ламинарным потоком обеспыленного воздуха, в рабочую зону печи вводят подложкодержатель (лодочку) с размещенными в нем пластинами. После прогрева пластин и лодочки через кварцевую трубу пропускают поток газа-носителя, к которому добавляется регулируемый поток парогазовой смеси реагента от внешнего источника. После определенной выдержки пластин при заданной температуре прекращают подачу парогазовой смеси и лодочку с пластинами извлекают из реактора.

Рассмотрим один из основных параметров — коэффициент диффузии, который, по сути дела, определяет требования к оборудованию. Установлено, что он связан с другими параметрами диффузии следующим соотношением:

$$D = D_0 e^{-Q/RT},$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; D_0, Q — основные параметры диффузии (D_0 — частотный множитель; Q^* — энергия активации).

Имеется также зависимость коэффициента диффузии от концентрации примесных атомов. Если построить график зависимости коэффициента диффузии от температуры (например, широко применяемых элементов бора, фосфора, мышьяка, алюминия в кремнии), то можно заметить, что наибольшее значение коэффициент диффузии имеет вблизи температуры плавления кремния (рис. 83).

Температурный интервал диффузионных печей выбирают в пределах 1000—1300 °С. В этих пределах коэффициент диффузии, например, для бора и фосфора, на три порядка отличается при изменении температуры от 1000 до 1300 °С. Разброс величины D обусловлен различием в величинах D_0, так как Q почти одинаков для всех приведенных элементов.

Рассмотрим требования к стабильности поддержания заданной температуры диффузионных печей. Если проанализировать зависимость коэффициента диффузии от входящих в формулу переменных величин, то можно заметить, что изменение температуры всего на несколько градусов может привести к двух-трехкратному увеличению коэффициента диффузии, а значит, и глубины залегания легирующего слоя. Так, при увеличении температуры через каждые 100 °С, начиная от 900 °С, коэффициент диффузии увеличивается примерно в пять раз.

---

* Q — энергия активации при диффузии определяется высотой потенциального барьера, который должна преодолеть частица для того, чтобы перейти из одного положения равновесия в решетке в другое, например, из одного узла или междуузлия соответственно в другой узел или междуузлие.

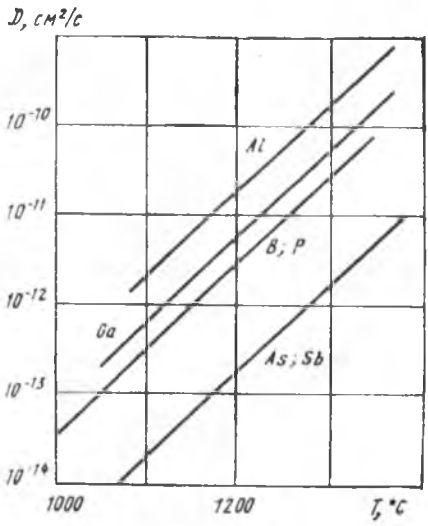


Рис. 83. Зависимость коэффициента диффузии примесей в кремнии от температуры

При конструировании диффузионных печей необходимо учитывать тот факт, что точность поддержания температуры в зоне печи должна быть не хуже $\pm 0{,}5\,^{\circ}C$, тогда изменение по глубине залегания примесей, например, бора и фосфора в кремнии, будет в пределах 1 %, что чрезвычайно важно при получении тонких ($\sim 0{,}1$ мкм) слоев.

Необходимость поддержания высоких температур диктуется также следующими обстоятельствами. Как известно, растворимость примеси в твердых телах и, в частности, в полупроводниках определяется видом примеси и температурой процесса. Чем выше температура, тем выше растворимость. При создании эмиттерной области транзисторов необходимо учитывать тот факт, что концентрация вводимой примеси должна быть порядка $10^{20} \div 10^{21}$ см$^{-3}$. Такую величину концентрации можно достигнуть при высоких температурах (порядка 1000—1300 °С).

Технология процессов диффузии, окисления и вжигания в полупроводниковом производстве и особенности эксплуатации оборудования в специальных помещениях с кондиционированием атмосферы определяют следующие требования к термическому оборудованию:

диапазон рабочих температур 800—1300 °С;

равномерность температур по длине рабочей зоны (от 600 до 1000 мм) не хуже $\pm 0{,}5\,^{\circ}C$;

малая инерционность;

малые габаритные размеры;

отсутствие необходимости работы с футеровкой печи при смене нагревателей.

Для проведения процесса диффузии, исходя из требований высокой чистоты диффузанта, подложки и технологической среды, в качестве камеры диффузионных процессов можно применять кварцевые и алундовые трубы, а также трубы из карбида кремния и поликристаллического кремния.

В основном для диффузии используют трубы из плавленного кварца, который имеет высокую чистоту в сравнении с обычным кварцем и алундом, небольшие внутренние напряжения, отсутствие больших пузырьков в теле трубы, а также высокую прозрачность для УФ- и ИК-излучений.

Высокие параметры плавленного кварца обеспечивают возможность получения толстостенных труб (6 мм вместо 3 мм), что удлиняет срок их службы. Размер применяемых кварцевых труб зависит от задаваемой производительности печи и диаметра обрабатываемых пластин и может достигать диаметра 0,2 м и длины свыше 2,0 м.

Применение алундовых труб для диффузионных процессов сдерживается их недостаточно высокой чистотой, хотя их механические параметры при высоких температурах значительно лучше, чем у кварцевых. Поэтому алундовые трубы используют в диффузионных печах лишь как несущие конструкции, не позволяющие прогибаться вставленной внутрь нее кварцевой трубе, размягчающейся при высокой температуре. В этом отношении трубы из поликристаллического кремния превосходят кварцевые и алундовые, так как имеют высокую чистоту материала, малую проницаемость для щелочных металлов (в виде соединений натрия) и близкий к кремниевым подложкам коэффициент теплового расширения. При этом время работы трубы из поликристаллического кремния при температуре 1300 °С почти в пять раз больше, чем у труб из кварца, так как кварц при этой температуре кристаллизуется и теряет механическую прочность. Применение труб из поликристаллического кремния, как и из карбида кремния, сдерживается трудностью их изготовления. Загрузочные кассеты (лодочки) для размещения подложек в диффузионном реакторе обычно делают из того же материала, что и сам реактор.

При проведении операций диффузии в термической печи возникает ряд нежелательных явлений, которые необходимо исключить соответствующими конструктивными решениями при проектировании диффузионных систем:

при введении в реактор подложкодержателя с полупроводниковыми пластинами, имеющими комнатную температуру, вносятся длительные возмущения в температурный статический режим диффузионной печи. Точность поддержания температуры в рабочей зоне диффузии будет меняться, что приведет к изменениям глубины и профиля распределения примесей в подложке. А быстрая загрузка или выгрузка пластин из высокотемпературной зоны может привести к их растрескиванию в результате термоудара;

длительное время нахождения подложкодержателя и кремниевых пластин при высоких температурах приводит к их спеканию, в том числе подложкодержателя и трубы. Особенно это характерно для труб и подложкодержателей из кварца. При последующем вынимании лодочки из печи возможно откалывание и появление пылевых частиц в реакторе;

при нестабильной скорости подачи газообразного диффузанта и неравномерной его плотности по сечению трубы меняются глубина и профиль распределения примесей в подложке.

Перечисленные выше факторы снижают производительность диффузионных печей, процент выхода годных структур на пластине и увеличивает себестоимость полупроводниковых приборов.

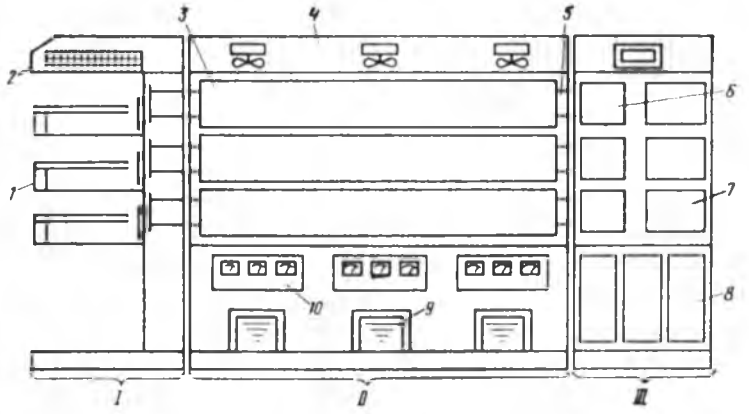


Рис. 84. Функциональная схема автоматизированной трехтрубной диффузионной печи:

I — система загрузки и выгрузки пластин; *II* — электропечь; *III* — система газовая; *1* — механизм автоматической загрузки; *2* — блок пылезащиты; *3* — нагревательные камеры; *4* — теплообменник; *5* — реакторы; *6* — увлажнители; *7* — устройства подачи диффузанта; *8* — блоки подготовки газов; *9* — системы силового питания; *10* — системы регулирования температуры

Для диффузионных процессов созданы сложнейшие диффузионные комплексы, включающие в себя, как правило, двух-, трех- или шеститрубные диффузионные агрегаты с обеспыленными боксами с ламинарными потоками, загрузчиками, газовыми шкафами, а также программаторами или миниЭВМ. Функциональная схема автоматизированной трехтрубной печи приведена на рис. 84.

Каждая нагревательная камера с соответствующими устройствами загрузки, электропитания, управления и газораспределения представляет собой автономную систему, в которой проводится свой, независимый от других камер технологический процесс.

Число реакторов в системе определяетя главным образом их диаметром (диаметром обрабатываемых пластин) и, соответственно, высотой их расположения над полом и удобством их обслуживания и эксплуатации.

2. КОНСТРУКЦИИ ТЕРМИЧЕСКИХ КАМЕР ДИФФУЗИОННЫХ ПЕЧЕЙ

Все конструкции термических камер современных печей содержат спиральный нагревательный элемент, состоящий обычно из трех секций. Крайние короткие секции нагревателя компенсируют тепловые потери по торцам и обеспечивают возможность получения равномерного температурного поля в центральной секции нагревателя. Каждая из секций нагревателя имеет одну регулирующую термопару и управляется от отдельного канала системы автоматического управления. Конструкция патрона-нагревателя с нагревательным элементом показана на рис. 85.

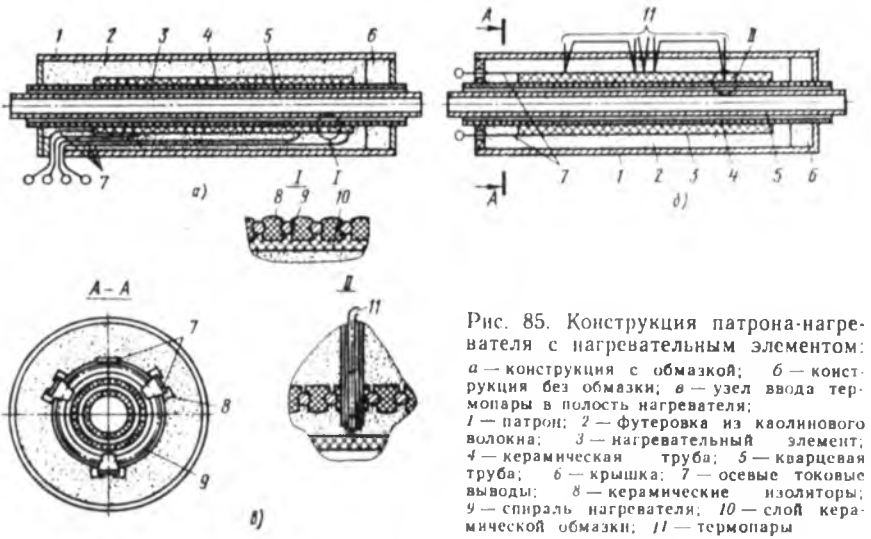


Рис. 85. Конструкция патрона-нагревателя с нагревательным элементом:
а — конструкция с обмазкой; *б* — конструкция без обмазки; *в* — узел ввода термопары в полость нагревателя;
1 — патрон; *2* — футеровка из каолинового волокна; *3* — нагревательный элемент; *4* — керамическая труба; *5* — кварцевая труба; *6* — крышка; *7* — осевые токовые выводы; *8* — керамические изоляторы; *9* — спираль нагревателя; *10* — слой керамической обмазки; *11* — термопары

Улучшение конструкций и параметров диффузионных печей достигнуто в результате перехода к металлическим нагревателям из сплава 0Х27Ю5А и применения нового вида теплоизоляции из каолинового волокна. Значительное снижение теплоемкости камеры и повышение ее динамических характеристик как объекта регулирования получены за счет увеличения плотности набивки волокна (~410 кг·м^3), что позволило в последующих конструкциях отказаться от применения внешней керамической трубы и подставок. Перспективно также использование каолинового волокна в виде плит, что значительно упрощает конструкцию камеры, снижает стоимость ее изготовления, массу и габаритные размеры. Поэтому при выходе из строя нагревательного элемента обычно производят смену всей термической камеры.

В термических камерах печей слой теплоизоляции из каолинового волокна позволяет получить градиент температур более $2/10^4$ К/м. Слой теплоизоляции, контактирующий с нагревателем, обычно толщиной ~7 мм, подвергается рекристаллизации, приобретает большую прочность с сохранением в дальнейшем формы, толщины и рельефа поверхности.

В термических камерах используется продольное размещение токоподводов по образующей нагревателя в специальных пазах керамических изоляторов, изготовленных из материала, содержащего не менее 81 % Al_2O_3. Это исключило влияние перетоков тепла по ним на распределение температуры в рабочей зоне. Кроме того, такое размещение шин увеличивает механическую устойчивость спирали и удерживает керамические изоляторы в первоначальном положении.

В печи типа СДО-125/3-12 расстояние между спиралью и то-

коподводами 2 мм. Спираль нагревателя с целью устранения местных перегревов изготовлена из шлифованной проволоки 0Х27Ю5А диаметром 5 мм, шаг витков спирали в средней секции 12,5 мм, в крайних секциях 10,5 мм. Длина крайних секций нагревателя равна двум диаметрам его спирали, что обеспечивает в сочетании с конструкцией торцевой изоляции камеры и выступающего на 100—150 мм за ее пределы керамического муфеля максимальную температуру витков крайней секции нагревателя не выше 1300 °С (при рабочей температуре 1250 °С). Этот факт установлен непосредственными замерами температуры витков крайней секции, причем оказалось, что максимум температуры приходится на витки, отстоящие на 1/4—1/3 длины крайней секции от средней секции. Такая конструкция нагревателя позволила создать серию однозонных диффузионных печей с различным числом агрегатированных на одном основании термических камер с длиной зоны равномерного распределения температур более 600 мм при диаметре канала печи до 120 мм.

Для уменьшения погрешности регулирования температуры, связанной с необратимыми перемещениями спая термопар относительно нагревателя при нагреве и охлаждении, все регулирующие термопары введены по касательной к внутренней образующей спирали нагревателя.

В диффузионных печах равномерность температур вдоль рабочей зоны камеры составляет ±0,5 °С на длине более 600 мм и ±0,25 °С на длине не менее 500 мм.

В настоящее время в промышленности применяют трехтрубные диффузионные агрегаты. Они наиболее экономичны в отношении использования загрузчика кассет с пластинами, газовых магистралей и занимаемой площади. Тепловая нагрузка диффузионной печи — 1,2 Вт/см² в центральной части печи, 1,6 Вт/см² — по краям при мощности печи 12 кВт. Максимальная температура при этом 1300 °С.

Центральная температурная зона обычно составляет 70—75 % общей длины нагревательной камеры. При этом температура на концах трубы и в центральной части отличается не более чем на ±50 °С. С целью сокращения занимаемой площади и удобства замены кварцевых труб диффузионные печи обычно располагают «спинами» друг к другу. В этом случае управление и обслуживание печей, обеспыленных боксов с ламинарными потоками загрузчиков и газовых систем предусматривается с одной стороны, а все устройства выполняют в правом и левом исполнениях.

3. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Нагреватель печи электрически разделен на три секции: рабочую *1* и вспомогательные *2*, *3*; электропитание и управление температурой осуществляется с помощью специальной системы (рис. 86).

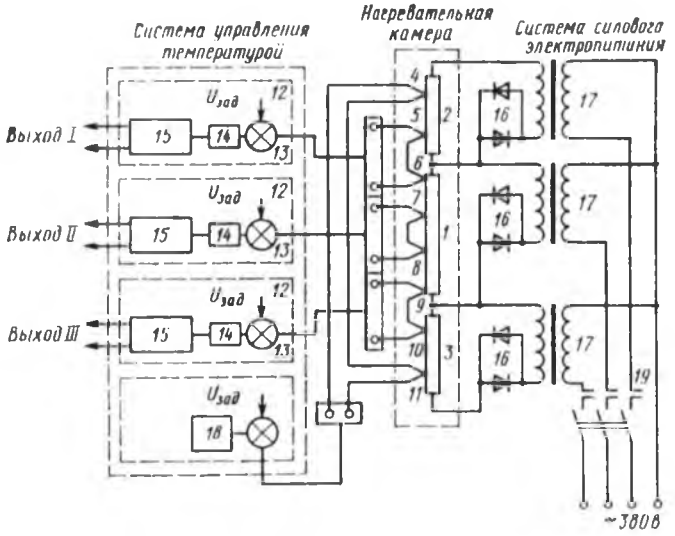


Рис. 86. Структурная схема автоматического регулирования температуры диффузионной печи:

1—3 — секции нагревателя; *4—11* — термопары; *12* — регуляторы температуры; *13* — устройство прецизионного задания температур; *14* — усилитель; *15* — функциональный усилитель мощности; *16* — тиристоры; *17* — силовые трансформаторы; *18* — ограничитель температуры; *19* — контактор

Для обеспечения высокой точности распределения температуры используют трехканальную систему регулирования с управлением вспомогательными секциями нагревателя *2* и *3* от рабочей секции *1*, задающей уровень рабочей температуры в реакторе. Регулирование температурного поля реактора осуществляют по трем точкам в местах расположения преобразователей температуры — термопар *4, 7, 8* и *11*. Центральный канал регулирования работает от двух термопар *7, 8*, размещенных в середине рабочей секции нагревателя. Для увеличения термоЭДС эти термопары включены последовательно. Рядом с ними с каждой стороны расположены термопары *6, 9*, включенные встречно термопаром крайних секций *5, 10*. В результате такого включения термопары *5—6* и *9—10* показывают отклонения температур крайних секций от температуры в центральной секции нагревателя. Для получения большой зоны равномерной температуры по длине нагревателя необходимо, чтобы температуры в рабочей и вспомогательных секциях были равны или близки по величине. При этом разности сигналов термопар *5—6* и *9—10* будут близки к нулю.

Все термопары подключают к регуляторам температуры *12*, в которых имеются устройства *13* прецизионного задания температур, соответствующих технологическому процессу. Разность между заданным и текущим значениями термоЭДС термопары в виде напряжения разбаланса поступает на усилитель *14* регуля-

тора температуры. Усиленный сигнал проходит в функциональный усилитель мощности *15*, где после ряда преобразований формируется в фазоимпульсный сигнал управления углом зажигания кремниевых вентилей — тиристоров *16*, включенных во вторичную обмотку силового трансформатора *17*. Силовые блоки обеспечивают на соответствующих секциях нагревательного элемента мощности, необходимые для поддержания заданных уровней температуры.

Схема работает следующим образом: при отклонении температуры в центральной части нагревателя (зона расположения пластин) система регулирования получает сигнал разбаланса и формирует соответствующий управляющий сигнал, который, пройдя через блок силового питания, вызывает изменение мощности секций нагревателя, необходимое для восстановления заданного уровня температуры.

Для защиты нагревателя от перегрева в его крайних секциях расположены термопары *4* и *11*, соединенные с ограничителем температуры *18*. При перегреве ограничитель воздействует на контактор *19*, отключая питание трансформаторов.

Система регулирования температуры позволяет также автоматически управлять кинетикой нагрева пластин; сущность управления состоит в следующем: при проведении «коротких» процессов большое внимание на качество слоев оказывают переходные режимы загрузки и выгрузки пластин. Для снижения влияния тепловых возмущений при загрузке холодной кассеты с пластинами температура в реакторе автоматически снижается на 100—150 °С (ниже рабочего уровня). Прогрев загрузки происходит при пониженной температуре. При этом скорость физико-химических процессов на поверхности пластин мала и неравномерность прогрева не отражается на качестве обработки. Затем температура в реакторе поднимается до заданной, при которой происходит процесс контролируемой диффузии или окисления. Система позволяет также осуществлять программное изменение температуры, причем скорость нарастания или снижения температуры задается в зависимости от размеров и массы загруженной в реактор садки.

4. ЭЛЕМЕНТЫ ДИФФУЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

Диффузионная система, например, печи СДО-125/3-12 предназначена для проведения прецизионных технологических процессов диффузии, окисления в потоке парогазовой смеси методом открытой трубы. Система включает в себя трехтрубную электропечь и сервисное оборудование: систему автоматической загрузки и выгрузки изделий, устройство газораспределения, измерительный стенд для периодической настройки и проверки температурного профиля печи. Рассмотрим кратко некоторые элементы диффузионной системы.

Автоматические загрузчики. С увеличением диаметра обрабатываемых пластин до 75 мм и выше увеличился бой пластин на

операциях диффузии. Последний обусловлен большими внутренними напряжениями в пластине и термоударами при загрузке и выгрузке пластин из высокотемпературных печей. Для предотвращения этого брака, а также брака, связанного со спеканием кварцевого подложкодержателя с кварцевой трубой, применяются автоматические загрузчики с реверсивным механизмом, позволяющим плавно вводить и выводить пластины в печь с заданной скоростью.

Автоматические загрузчики выполняют следующие функции:

введение пластин в диффузионную печь с определеной регулируемой ступенями скоростью (100—200 мм/мин);

покачивание подложкодержателя (лодочки) в высокотемпературной зоне (ориентировочно 2,5 мм/мин при размахе 20 мм);

выгрузка пластин из высокотемпературной зоны с определенной скоростью (25—100 мм/мин).

Чтобы не вносить загрязнений, шток толкателя автоматического загрузчика делают из кварца той же чистоты, что трубы и лодочки. Применение автоматических загрузчиков резко сокращает бой пластин, особенно большого диаметра, исключает ошибки оператора и сокращает трудоемкость операции на диффузионных процессах. Кроме этого, повышается воспроизводимость характеристик легированных слоев от партии к партии пластин.

Автоматические загрузчики помещают в обеспыленные боксы, установленные на входе диффузионных печей, чтобы обеспечить требования полупроводниковой гигиены при перегрузке пластин из тары в подложкодержатель и введении его в реактор.

Газовый шкаф. Газовый шкаф предназначен для подготовки, подачи и регулирования газовых потоков при проведении диффузии и окисления кремниевых пластин. Устройство подготовки и газораспределения обеспечивает поочередное проведение основных технологических операций:

окисление кремниевых пластин;

насыщение поверхностного слоя легирующими примесями;

проведение диффузии примесей в глубь пластин за счет обеднения поверхностного слоя.

Газовые системы диффузионных печей компонуются в модули, встраиваемые в оборудование. Если печь содержит несколько реакторов, то модули объединяют в общий шкаф для удобства их обслуживания. При создании модулей в основном используют унифицированные и типовые элементы.

Газовые системы должны отвечать ряду важнейших конструктивно-технологических требований, от выполнения которых в значительной степени зависит качество получаемых слоев. Газовые системы должны быть герметичными. Конструкция и монтаж должны исключать проникновение в систему воздуха и влаги из окружающей среды, а из системы в окружающую среду — реакционных газов, в особенности токсичных и взрывоопасных. Материалы газовых систем не должны вносить загрязнений в вещества, используемые в процессах производства, и вступать с ними в ре-

акции. Конструкции газовых систем не должны содержать непродуваемых участков и застойных зон. Они должны иметь свободный доступ к аппаратуре, трубопроводам и разъемам для проведения периодического осмотра, ремонта и очистки. Необходимо обеспечить соблюдение требований техники безопасности и промышленной санитарии, позволяющих устанавливать оборудование в общих производственных помещениях.

На рис. 87 приведены различные схемы газораспределения диффузионных печей.

Магистраль инертного газа служит для подачи газа-носителя диффузанта. Магистраль подачи диффузанта из жидких соединений в виде парогазовой смеси (рис. 87, *а*) во избежание конденсации легирующих примесей на стенках трубопроводов делают с подогревом. В системах применяют электромагнитные клапаны *КЛ* для перекрытия магистралей, ротаметры или другие приборы для контроля расхода газов *ИП*, натекатели, стабилизаторы заданного расхода газов *РД*. Для диффузии таких примесей, как бор и фосфор, в кремний, как правило, используют жидкие химические соединения (например, BBr_3, $POCl_3$). Применение их вместо газообразных выгодно вследствие лучшей стабилизации и регулирования потоков диффузанта в печи, так как концентрация диффузанта регулируется как температурой нагрева жидкости, так и скоростью потока газа-носителя.

При дистанционном пневмоэлектрическом управлении запорными клапанами происходит автоматическая (по программе) подача парогазовых смесей и газов в реакторы диффузионной печи.

5. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В СОЗДАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ДИФФУЗИИ И ОКИСЛЕНИЯ

Для повышения производительности и эффективного использования дорогостоящих площадей с кондиционированием важным направлением в конструировании диффузионных печей являются их компоновка в многоярусные агрегаты, а также повышение точности поддержания температуры и равномерности температурного поля до 0,1—0,25 °С и увеличение длины рабочей зоны до 800 мм.

При создании агрегатированных печей одним из главных вопросов является снижение тепловых потерь и введение в конструкцию печей принудительного воздушного охлаждения кожуха с водяным теплообменником. Это значительно снижает нагрузку на кондиционеры и уменьшает число вентиляционных магистралей.

Для повышения надежности работы нагревателя помимо улучшения качества самого сплава увеличивают диаметр проволоки от 5 до 7 мм при введении шлифовки и специального предварительного окисления поверхности. Дополнительное увеличение ресурса нагревателя можно получить, проводя химико-термическую обработку его поверхности (алитирование, силицирование и нитрирование).

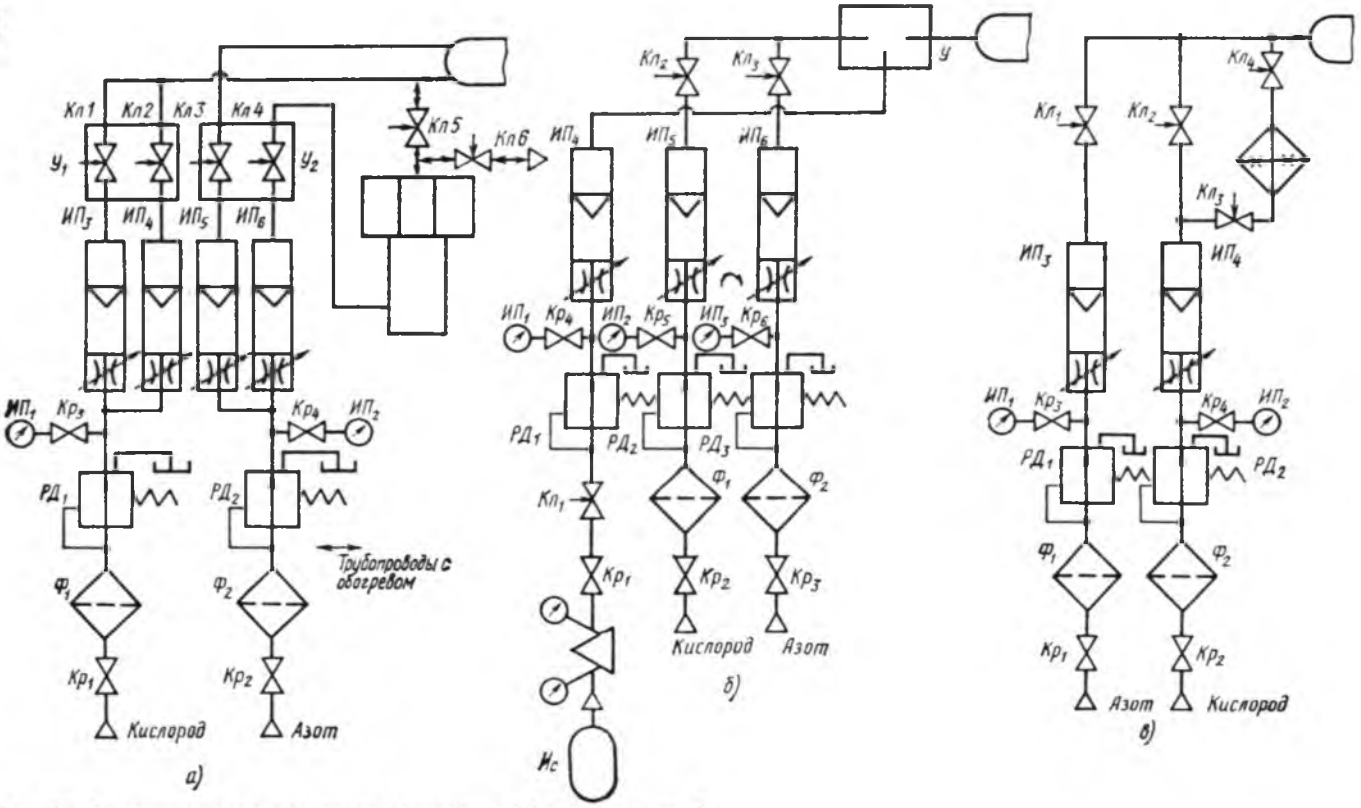


Рис. 87. Различные схемы газораспределения диффузионных печей:

а — с жидким диффузантом; *б* — с газообразным диффузантом; *в* — для окисления
Кр — краны с ручным управлением; *Ф* — фильтры; *РД* — регуляторы давления; *ИП* — измерительные приборы; *Кл* — клапаны с пневмоэлектрическим управлением; *Ис* — источники парогазовой смеси или газообразного диффузанта; ↔ — трубопроводы с обогревом

В системах регулирования повышение надежности достигается применением полностью бесконтактной системы регулирования с полупроводниковой модуляцией сигнала от термопары, увеличением точности системы, введением защиты от перегрева нагревателя, экранировкой термопар, а в дальнейшем, с внедрением на диффузионных участках микропроцессоров, введением дублирующих систем регулирования.

Высокая насыщенность производственных участков агрегатированными печами, повышение их производительности и сокращение рабочих циклов потребует в ближайшее время полной автоматизации участков диффузии и сервисного оборудования с вынесением сигнализации и управления отдельными операциями на централизованный пульт оператора, т. е. создания автоматических поточных линий диффузии.

Процесс окисления при нормальном давлении в сухом и увлажненном кислороде проводится в интервале температур 1050—1150 °С. Однако более перспективно термокомпрессионное окисление в интервале температур 700—950 °С при давлении до $25 \cdot 10^5$ Па в среде влажного кислорода или водяного пара, а также при давлении до $707 \cdot 10^5$ Па в среде сухого кислорода.

ГЛАВА 9

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Ионное внедрение (имплантация) — введение ионизированных атомов примеси в поверхностный слой подложки при сообщении этим ионам большой кинетической энергии (от килоэлектрон-вольт до мегаэлектрон-вольт). По мере продвижения иона в подложке он отдает энергию атомам и молекулам, останавливаясь на определенной глубине от ее поверхности.

Принципиальное отличие метода ионной имплантации от термодиффузии состоит в способах сообщения энергии атомам примеси: в термодиффузии — при нагреве до высокой температуры (900—1300 °С), при ионном легировании — при ионизации атомов примеси и ускорении их в результате приложения разности потенциалов.

Преимущества ионного легирования (имплантации) перед термодиффузией:

легирование атомами любых веществ независимо от предельной растворимости при любых температурах;

создание в подложке скрытого слоя на некотором расстоянии от поверхности подложки;

получение неглубоких ($\leqslant$0,1 мкм) легированных слоев, в том числе ступенчатых;

легирование подложки через защитный слой;

управление с высокой точностью глубиной и профилем распределения примесей в подложке путем изменения энергии и дозы вводимых ионов примеси.

К недостаткам ионной имплантации можно отнести сложность оборудования и остаточные радиационные дефекты в подложке.

Для проведения процесса ионной имплантации необходимо ионизировать легирующую примесь, сообщить иону примеси соответствующую энергию для внедрения на заданную глубину в подложку, отсепарировать по массам примесные атомы от нежелательных элементов и направить ионы на поверхность подложки для их внедрения. Для выполнения перечисленных технологических операций процесса ионной имплантации установка должна содержать ионный источник, экстрагирующую и фокусирующую оптику, ускорительную трубку, масс-сепаратор, устройство сканирования ионного пучка, систему источников питания, приемную камеру, вакуумную систему, а также устройства контроля и управления технологическим процессом.

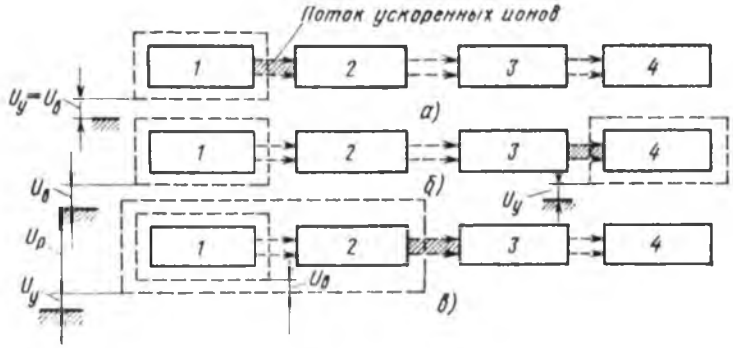


Рис. 88. Классификация установок ионной имплантации по методу ускорения: $U_в$ — напряжение вытягивания ионов; $U_у$ — ускоряющее напряжение; *1* — ионный источник; *2* — масс-сепаратор; *3* — сканирующее устройство; *4* — приемное устройство

Классификация установок ионной имплантации по методу ускорения приведена на рис. 88. Если ускорение ионов осуществляется до масс-сепаратора ($U_у = U_в$), то такие установки называют установками с доускорением (рис. 88, *а*), а установки, ускоряющие ионы после масс-сепаратора ($U_у$), — с послеускорением (рис. 88, *б*). Возможно ускорение ионов за счет прикладываемого на ионном источнике потенциала вытягивания ($U_в$) (рис. 88, *в*). В установках этого типа небольшая энергия ионов до 50 кэВ.

Системы ионной имплантации с доускорением имеют ускоритель, расположенный между ионным источником и сепаратором, и работают в режиме ускорения несепарированного пучка. Поскольку в этом случае производится сепарация ионного пучка, уже

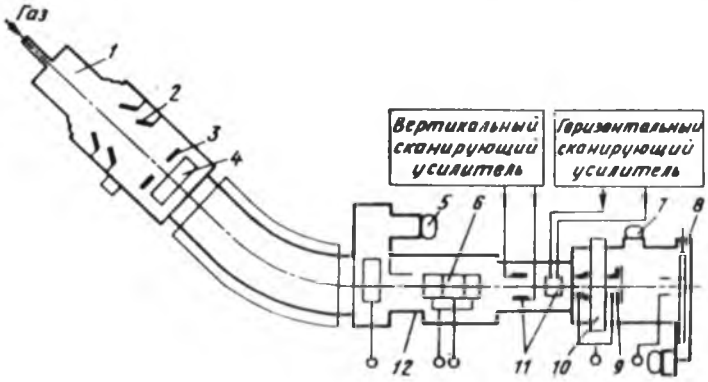


Рис. 89. Функциональная схема установки ионной имплантации:

1 — ионный источник; *2* — экстрагирующая система; *3* — электрод смещения; *4* — щелевые линзы; *5* — диффузионный насос; *6* — фокусирующая система; *7* — диффузионный насос; *8* — подложкодержатель; *9* — датчик; *10* — заслонка; *11* — система электростатического сканирования; *12* — ускоритель

предварительно ускоренного до заданной максимальной энергии, то системы ионной имплантации, построенные по такой схеме, используются для работы с энергиями ионов до 100 кэВ.

Системы ионной имплантации с послеускорением имеют два ускорителя, расположенные после ионного источника и перед приемной камерой, что позволяет получать пучок с высокой энергией ионов за счет его предварительного ускорения до энергии 100 кэВ перед сепарацией масс и финишного ускорения до заданной максимальной энергии.

На рис. 89 приведена функциональная схема установки ионной имплантации.

2. ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Ионные источники. Источник ионов производит ионы необходимого типа и имеет устройство экстракции ионов. К источникам ионов предъявляют следующие требования:

создание однородного высокоинтенсивного ионного пучка со стабильными во времени параметрами;

получение предельной для данной конструкции плотности ионного тока при максимально низких экстрагирующих напряжениях;

ионизация как газообразных (BF_3, BCl_3, $AsCl_3$, AsF_3, PCl_3, O_2, N_2 и т. д.), так и твердых (B, As, Sb, Al и др.) диффузантов;

легкая замена легирующего элемента;

первичное формирование ионного пучка различной заданной формы;

простота управления;

значительное время наработки на отказ катода и источника в целом.

Независимо от типа ионный источник должен обеспечить процесс возбуждения атомов, например, рабочего газа до энергии большей первого потенциала ионизации, с образованием положительных ионов. Классическим методом реализации этого процесса является электрический разряд в газе.

Ионные источники содержат следующие элементы:

разрядную, или ионизационную, камеру, которая может являться несущей конструкцией источника;

анод, предназначенный для создания электрического поля внутри разрядной камеры;

источник электронов (нагреваемый термокатод, холодный или полный катод);

магнитную систему для повышения эффективности ионизации и плотности плазмы в зоне экстракции ионов;

экстрагирующий электрод и электроды первичной фокусировки пучка, предназначенные для экстракции ионов из зоны плазмы;

систему подачи рабочего газа или устройства испарения (распыления) твердого легирующего материала;

систему источников питания.

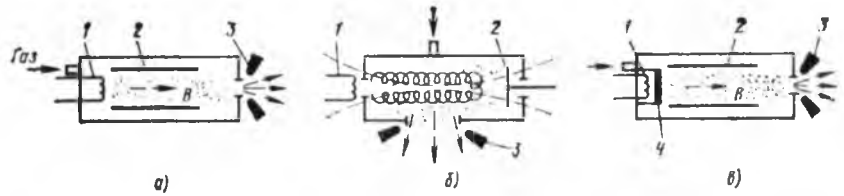


Рис. 90. Ионные источники с горячим катодом:

а, б — прямого накала; *в* — косвенного накала;
1 — катод; *2* — анод; *3* — экстрактор; *4* — катод косвенного накала; *B* — вектор магнитной индукции

Наиболее распространенными и относительно простыми являются ионные источники с горячим катодом. На рис. 90 показаны ионные источники с горячим катодом прямого и косвенного накала. Электроны эмиттируются с плотностью ~ 1 А/см^2. В результате в объеме разрядной камеры образуется область относительно однородной плазмы с плотностью ионов $\sim 10^{12} \div 10^{14}$ см$^{-3}$ при плотности атомов рабочего газа, соответствующей давлению $\sim 1{,}3 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-1}$ Па.

Ионная-транспортная система. Установка ионной имплантации включает в себя устройства, предназначенные для транспортировки ионного пучка от ионного источника до мишени без деградации первичного сформированного пучка. При этом каждое из устройств несет собственную функциональную нагрузку. В общем случае система ионно-пучковой транспортировки должна обеспечить требуемые параметры легирующего ионного пучка в зоне мишени, в частности: энергию ионов, интенсивность пучка (плотность ионного тока), стабильность ионного тока во времени и по площади мишени, разрешение и форму пучка в зоне мишени, высокую изотопную чистоту пучка.

Таким образом, транспортная система должна содержать ускоритель ионов, устройства фокусировки, сепарации масс и сканирования ионного пучка, а также приемную камеру. Каждое из этих устройств в известной степени определяет стоимость, производительность, а также предельные технические параметры системы ионной имплантации.

Устройства ускорения ионов. На рис. 91 показана конструкция ионно-транспортной системы с трехэлектродным ускорителем, обеспечивающим получение ионного пучка с энергией от 25 до 200 кэВ.

Трехэлектродный ускоритель расположен сразу за сепаратором масс, энергия ионов на выходе ускорителя определяется отношением напряжений на электродах U_1 (экстрактор), U_2 (усредняющий электрод) и ускоряющем электроде U_3. В данной конструкции размеры ускорителя выбраны таким образом, что напряжение $U_1 = 26$ кВ, $U_2 = 10 \div 35$ кВ и $U_3 = 25 \div 200$ кВ, т. е. наибольшая разница потенциалов приходится на пространство между вторым и третьим электродами.

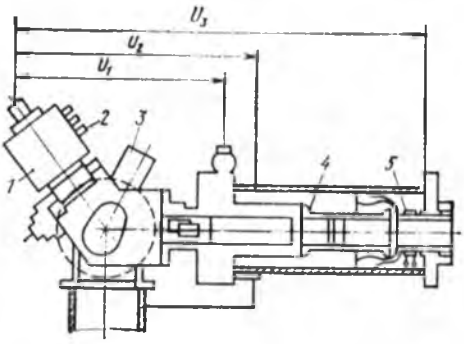


Рис. 91. Конструкция ионно-транспортной системы установки ионной имплантации с трехэлектродным ускорителем ионов:
1 — ионный источник; *2* — экстрактор; *3* — магнит; *4* — трехэлектродный ускоритель; *5* — нагреватель

Приемное устройство. Приемное устройство предназначено для загрузки полупроводниковых пластин, перемещения их под ионный пучок, легирования и нагрева. Поперечное сечение ионного пучка составляет несколько квадратных миллиметров и по площади пучок неоднороден. Для легирования пластин с высокой однородностью необходимо перемещать пучок по пластине или пластину относительно пучка. Чаще применяют сканирование пучка. В процессе легирования для отжига возникающих радиационных дефектов в пластинах их нагревают до температуры 200—700 °С. Для увеличения интенсивности пучка используют дополнительные фокусирующие линзы.

3. ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКЕ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

В разработке оборудования для ионной имплантации можно отметить следующие направления:

повышение энергии ионов и плотности ионного тока;

использование способа индивидуальной обработки одиночной пластины;

применение безмасляных средств откачки системы.

Повышение энергии ионов и ионного тока определяется требованиями технологии к получению глубоких имплантированных слоев (в том числе скрытых) без снижения производительности обработки. Сравнение серийных и разрабатываемых систем ионной имплантации приведено в табл. 10.

В современном технологическом оборудовании для имплантации должны совмещаться два предельных параметра: высокая энергия ионов (до 600 кэВ) и высокая плотность тока (до 8 мА).

Процесс имплантации неизбежно связан с появлением дефектов в кристаллической решетке. Имплантированный слой становится аморфным и теряет свою электрическую активность. Лазерный отжиг используется в промышленной технологии больших интегральных схем с целью устранения дефектов кристаллической решетки. Главное преимущество лазерного отжига в том, что он обладает малой продолжительностью нагрева и охлаждения материала (микросекунды), локальностью, точностью нагрева по

Таблица 10. **Параметры систем ионной имплантации**

Наименование параметра	Серийные установки		Новые разработки	
	Диапазон значений	Точность, %	Диапазон значений	Точность, %
Ускоряющее напряжение, кВ	5—450	3	2—600	0,5—1,0
Доза, $см^{-2}$	$10^{12} \div 10^{16}$	$\pm 2 \div \pm 15$	$1 \cdot 10^{10} \div 2 \cdot 10^{17}$	± 2
Однородность, %	± 1	± 3	± 1	± 3
Тип ионов	B, P, As, H	—	Be, Zn, Cd, Al, Si, Sb, S, Te	—
Масса ионов	1—31 (75)	± 1	1—130	± 1
Давление, Па	$6,5 \cdot 10^{-5}$—$1,3 \cdot 10^{-4}$	—	$1,3 \cdot 10^{-5}$ (Безмасляная откачка)	—

глубине и площади. При лазерном отжиге уменьшается время обработки, ограничивается диффузия и нарушение стехиометрии состава.

Мощные лазерные импульсы применяют для эпитаксиальной кристаллизации аморфных слоев полупроводниковых материалов после полного внедрения примесей. Например, отжиг с помощью лазера на алюмоиттриевом гранате, легированном неодимом, выполняется в нормальной атмосфере. Эпитаксиальная кристаллизация аморфного слоя кремния толщиной 0,4 мкм проводилась при воздействии одиночных импульсов лазерного излучения с длиной волны 1,064 мкм и пиковой плотностью энергии от 3,0 до 5,0 $Дж/см^2$. Эпитаксиальный слой не имел дефектов.

В настоящее время созданы установки для лазерного отжига в непрерывном режиме. Система обеспечивает отжиг пластины диаметром 110 мм за 2—3 мин. Диаметр пятна 20—200 мкм, мощность луча 0—15 Вт, частота сканирования 0—500 см/с.

ГЛАВА 10

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЭПИТАКСИИ

1. ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВКАМ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЭПИТАКСИИ

Эпитаксия — процесс ориентированного наращивания, в результате которого образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы — подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя.

Основными этапами эпитаксии из газовой фазы являются:

формирование, контроль и управление исходной для процесса парогазовой смесью заданного состава;

транспортировка парогазовой смеси в реактор и распределение ее по объему реакционной зоны;

нагрев подложек до требуемой температуры и осаждение на них вещества из газовой фазы;

удаление продуктов реакции и их утилизация.

Основными параметрами эпитаксиальных структур являются толщина наращиваемого слоя и удельное сопротивление. Для получения этих параметров с требуемой точностью ($\pm 5\,\%$) установка для эпитаксиального наращивания должна удовлетворять следующим требованиям:

поддерживать температуру подложек с точностью ± 5 К;

обеспечивать постоянный состав парогазовой смеси и стабилизацию газовых потоков;

создавать одинаковые условия протекания процесса для всех подложек, находящихся в реакторе;

обеспечивать соблюдение полупроводниковой гигиены;

Кроме того, она должна иметь технические средства (датчики) для измерения основных параметров процесса газовой эпитаксии.

Для выполнения перечисленных требований установка для эпитаксиального наращивания должна содержать следующие элементы: реактор, газовую систему, систему нагрева, систему управления процессом и вспомогательные устройства.

2. РЕАКТОРЫ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЭПИТАКСИИ

При конструировании реакционной камеры необходимо учитывать:

1) температурные условия (необходимость одной или нескольких температурных зон) и способ нагрева подложек;

2) производительность за 1 ч, за один цикл и кратность стандартным партиям в производстве интегральных микросхем;

3) равномерность физических свойств, качество осаждаемых слоев и процент выхода годных структур;

4) рабочее давление (атмосферное, повышенное или пониженное);

5) физико-химические свойства исходных веществ (необходимость изготовления реакционной камеры из специальных материалов, охлаждения стенок камеры);

6) способ переноса парогазовой смеси, исключающий преждевременное, до достижения подложки, выделение осаждаемого материала;

7) возможность автоматизации и механизации операций загрузки и выгрузки;

8) контроль за процессом (окно в стенке реактора) и возможность применения различных технических средств для управления процессом внутри реактора;

9) адаптивность к производству различных и более совершенных структур, а также к переходу на подложки увеличенного диаметра;

10) снижение энергоемкости реактора и удельных затрат на единицу обрабатываемой площади;

11) возможность интеграции нескольких технологических процессов;

12) возможность перехода от периодических процессов к непрерывным.

Разброс параметров эпитаксиальных слоев, выращенных в конкретном реакторе на обрабатываемых подложках, зависит от особенностей конструкции реакционной камеры, связанных с созданием одинаковых условий протекания процесса при групповой обработке пластин в установках периодического действия, возможностью управления процессами тепло- и массопереноса и обеспечения оптимальных условий наращивания эпитаксиального слоя для всех обрабатываемых подложек.

Реакторы изготавливают из кварцевого стекла, коррозионностойкой стали, хромоникелевых сплавов и монель-металла.

Реакторы установок эпитаксиального наращивания можно разделить на два типа: горизонтальный и вертикальный. Схемы реакционных камер установок эпитаксиального наращивания показаны на рис. 92.

Горизонтальный реактор. Реакторы горизонтального типа не имеют внутри движущихся частей. Поток парогазовой смеси подается в реактор параллельно его оси. Схема реактора горизонтального типа приведена на рис. 92, *а*.

Реактор *1* изготавливают из кварцевой трубы круглой или прямоугольной формы. Внутри реактора размещают подложкодержатель *3*, выполненный из графита и установленный на подставках с определенным углом наклона для выравнивания состава парогазовой смеси вдоль длины подложкодержателя.

В процессах эпитаксиального роста кремния при использова-

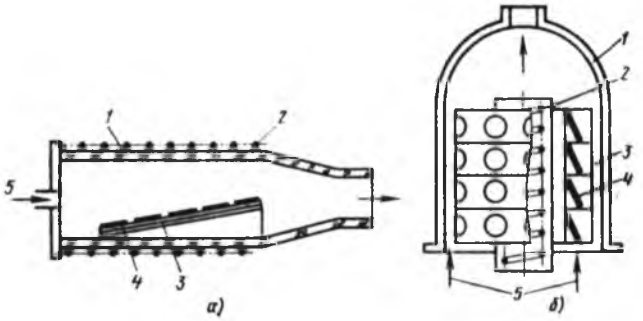


Рис. 92. Схемы реакторов для газовой эпитаксии:
а — горизонтального типа; *б* — вертикального;
1 — реакционная камера; *2* — индуктор; *3* — подложкодержатель; *4* — подложки; *5* — подача парогазовой смеси

нии SiH_4, $SiHCl_3$ или $SiCl_4$ угол наклона подложкодержателя изменяют в соответствии с неравенством

$$\operatorname{tg}\alpha_{SiH_4} > \operatorname{tg}\alpha_{SiHCl_3} > \operatorname{tg}\alpha_{SiCl_4}.$$

На подложкодержателе *3* размещают подложки *4*. Для нагрева подложек используют индукционный, резистивный или лучистый нагрев. При индукционном нагреве применяют индуктор *2*, подключенный через согласующие цепи к генератору токов высокой частоты. На разброс параметров наращиваемого слоя оказывает значительное влияние газодинамическая обстановка в реакторе. Для реактора горизонтального типа естественная конвекция направлена перпендикулярно направлению вынужденной конвекции. В этих условиях наблюдается течение газов в виде спиралей или вихрей. В условиях только вынужденной конвекции наблюдается ламинарное течение газовых потоков. Переход от реакторов круглой формы к прямоугольно-эллиптической позволяет увеличить производительность установки и снизить разброс параметров наращиваемого слоя.

Температуру нагревателя измеряют оптическим пирометром, а температуру газового потока на выходе из реактора — хромель-алюмелевой термопарой, введенной в реактор в кварцевом чехле перпендикулярно потоку газа. Для описания гидродинамической обстановки, тепло- и массообмена в реакторе используют критерии подобия.

Каждый критерий имеет определенный физический смысл. Критерий Рейнольдса (Re) выражает отношение силы инерции к силе трения, критерий Грасгофа (Gr) — отношение подъемной силы к силе инерции. В условиях естественного движения среды критерий Re заменяется критерием Gr. При математическом описании конвективных процессов тепло- и массоотдачи используют критерий Нуссельта (Nu).

Для расчетов критериев подобия используют следующие выражения:

$$\mathrm{Re} = Vd_э/\nu_{H_2};$$

$$\mathrm{Gr} = \beta d_э^3 g\,(T_{нагр} - T_{ст})/\nu_{H_2};$$

$$\mathrm{Nu} = \alpha \frac{d_э}{\lambda_{H_2}} = q_{H_2 конв}\, d_э/[(T_{нагр} - T_{ст})\,\lambda_{H_2}],$$

где V — средняя скорость движения газа над поверхностью нагревателя; $d_э$ — эквивалентный диаметр реактора; ν_{H_2} — коэффициент кинематической вязкости водорода; β — коэффициент объемного расширения газа; g — ускорение силы тяжести; $T_{нагр}$ — температура нагревателя; $T_{ст}$ — температура стенки реактора, °С; α — коэффициент теплоотдачи нагревателя; λ_{H_2} — коэффициент теплопроводности водорода; $q_{H_2 конв}$ — плотность теплового потока, отдаваемая нагревателем путем конвективного теплообмена в атмосфере водорода.

Толщину теплового пограничного слоя при обтекании нагревателя ламинарным потоком газа в реакторе горизонтального типа можно определить с помощью уравнения

$$\delta_t = \frac{x}{0{,}33\,\mathrm{Re}_x^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,33}},$$

где x — координата по длине нагревателя; Re_x — критерий Рейнольдса, вычисленный для точки x при комнатной температуре.

Пограничный слой начинает образовываться при $x=0$ и увеличивается в направлении x. Пограничный слой, прилегающий к подложкодержателю, увеличивается по толщине быстрее, чем на верхней стенке. Между этими пограничными слоями существует центральная зона (сердцевина потока) газа с различными температурными и концентрационными градиентами. Эта зона может заключать запас реагента в газовом потоке, из которого он диффундирует через пограничный слой, достигая поверхности роста.

Для расчета критериев подобия по уравнениям в качестве определяющей температуры использована среднеарифметическая температура нагревателя и стенки ($T_{ст}=100$ °С). Величина получена интегрированием параболического распределения скорости потока при комнатной температуре и составляет 1,6 от общей средней скорости потока.

Результаты расчета зависимостей Nu — Gr и Nu — Re приведены на рис. 93. Из рис. 93, *а* видно, что критерий сохраняет постоянное значение, равное 4,4 при изменении критерия Gr от 650 до 1000 (температура нагревателя от 1100 до 900 °С) и несколько увеличивается при возрастании критерия Gr от 1000 до 1250 (температура нагревателя от 900 до 800 °С). Из рис. 93, *б* также видно, что критерий Nu не изменяется при увеличении критерия Re от 0,1 до 20 (скорость потока газа от 0,13 до 25 см/с). При дальнейшем увеличении критерия Re от 20 до 100 (скорость по-

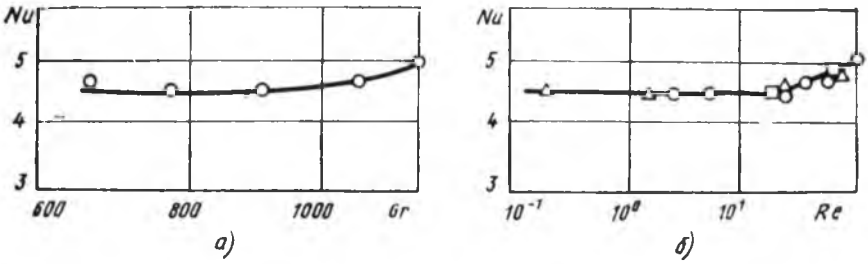


Рис. 93. Влияние критериев Gr и Re на критерий Nu:
а — зависимость Nu—Gr; *б* — зависимость Nu—Re при температурах нагревателя, °С: ○ — 960, △ — 1160, □ — 1240

тока газа от 25 до 130 см/с) критерий Nu возрастает. Это характеризуется некоторым уменьшением температуры нагревателя. Условия, при которых критерий Nu не зависит от критериев Gr и Re, характерны для теплообмена за счет теплопроводности газовой среды при ламинарном движении газа.

Установлено, что движение парогазовой смеси при скоростях потока 0,13—130 см/с и температурах нагревателя 800—1100 °С носит ламинарный характер. При скоростях потока 0,13—25 см/с и температурах выше 900 °С теплообмен в реакторе осуществляется за счет теплопроводности газовой среды.

При скоростях потока выше 25 см/с на теплообмен начинают влиять формирование теплового пограничного слоя, а при температурах ниже 900 °С — естественная конвекция газового потока.

Распределение температуры в горизонтальном реакторе (при температуре подложкодержателя $T_п$=1200 °С и V_0=50 см/с) показано на рис. 94. При этом видно, что на расстоянии до 1,5 см над подложкодержателем существует крутой температурный градиент, который ближе к стенке реактора становится пологим, а температура верхних порций газа увеличивается в направлении движения газа.

На рис. 95 приведены изобары давления паров $SiCl_4$ в горизонтальном реакторе, полученные измерением пространственного распределения парциального давления $SiCl_4$ с помощью масс-

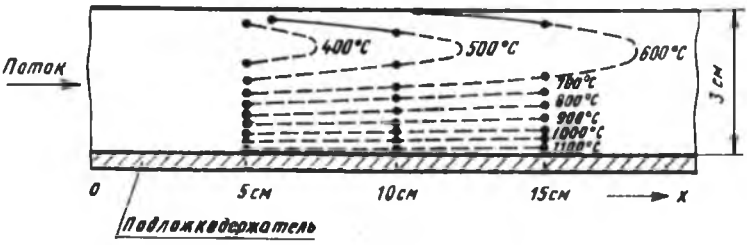


Рис. 94. Изотермы в горизонтальном реакторе

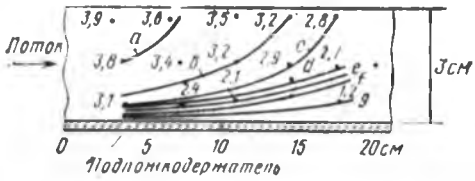


Рис. 95. Изобары паров $SiCl_4$ в горизонтальном реакторе:
а — 3, 6; *b* — 3, 2; *c* — 2,8; *d* — 2,4; *e* — 2,0; *f* — 1,6; *g* — $1{,}2\times10^{-3}$ атм

спектрометрического отборника. В верхнем пространстве реактора (у стенок) существует более пологий концентрационный градиент, чем над подложкодержателем, где изобары сходятся вместе. Градиент парциального давления существует также в направлении движения парогазовой смеси, что обусловлено обеднением реагента, вследствие его расхода на наращивание пленки.

Весьма перспективным направлением в конструировании реакторов является создание конструкций с объемным расположением подложек и их двусторонним нагревом, что приближает условия обработки подложек к условиям в изотермических реакторах. Схема реактора с объемным расположением подложек при двустороннем нагреве показана на рис. 96.

Подложкодержатель представляет собой конструкцию, выполненную из молибденовых стержней *2* (типа «беличьего колеса») и приводимую во вращение. С помощью этих стержней крепят параллельно друг другу графитовые диски *3* толщиной 2,5 мм. Зазор между дисками составляет 7 мм. К каждому графитовому диску с обеих сторон крепят исходные подложки *4* с помощью тонких колец из молибдена или карбида кремния. Различные варианты ввода парогазовой смеси в каждый из зазоров между дисками и формы осаждаемых слоев показаны на рис. 97. Наиболее равномерный по толщине слой осаждаемого вещества получается при подаче парогазовой смеси через коллектор, качающийся по дуге (рис. 97, *в*). Коллектор представляет собой кварцевую трубку диаметром 13 мм с отверстиями диаметром 2 мм.

Технико-экономические показатели реактора с объемным расположением подложек при их двустороннем нагреве лучше, чем у обычного реактора горизонтального типа. Так, например, для нагрева подложки в реакторе с объемным расположением подложек до температуры 1100 °С требуется 0,5—1,0 кВт вместо 2—4 кВт для других типов реакторов. Эта экономия энергии объясняется уменьшением потерь на излучение при таком расположении под-

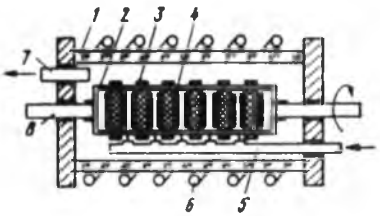


Рис. 96. Схема реактора с объемным расположением подложек:
1 — кварцевый реактор; *2* — стержни; *3* — графитовые диски; *4* — подложки; *5* — коллектор парогазовой смеси; *6* — индуктор; *7* — патрубок для выхода парогазовой смеси; *8* — вал с пакетом подложек

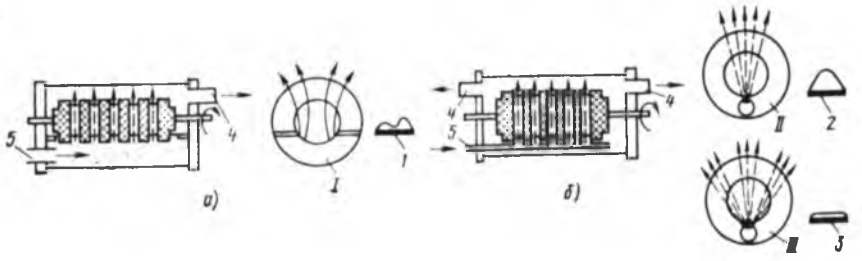


Рис. 97. Различные варианты ввода парогазовой смеси в реактор:
а — через патрубок; *б* — через коллектор; *в* — через качающийся коллектор; *I*, *II*, *III* — схемы подачи парогазовой смеси в реактор; *1—3* — профили осаждаемых пленок; *4* — выходы отработанной парогазовой смеси; *5* — входы парогазовой смеси

ложек. Скорость роста слоев кремния в реакторе с объемным расположением подложек и двусторонним нагревом до 5 мкм/мин вместо 1 мкм/мин в реакторах других типов.

Вертикальный реактор. Вертикальный реактор предназначен для массового производства эпитаксиальных структур с точностью распределения температуры по подложкодержателю ±3 °С, разбросом толщины и удельного сопротивления выращенных слоев в пределах ±10 %. Для пластин разных ярусов разброс увеличивается. Многоярусный подложкодержатель равномерно вращается со скоростью 3÷120 об/мин.

На структуру потока влияет его скорость, условия нагрева, форма подложкодержателя, геометрия реакционных камер и ориентация их в пространстве, организация ввода парогазовой смеси и удаления из камер продуктов реакции.

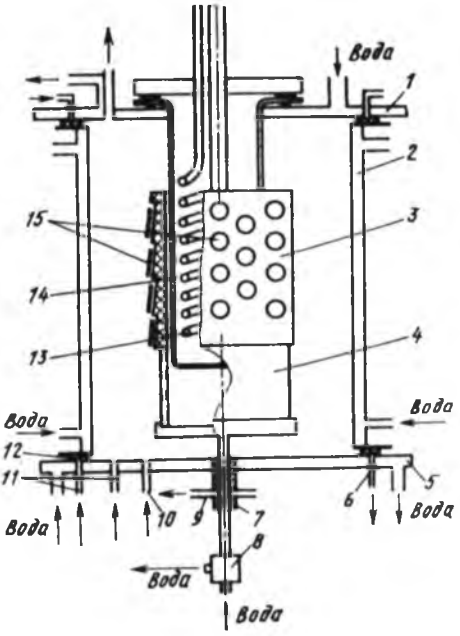


Рис. 98. Схема цилиндрического промышленного реактора:
1 — верхний фланец; *2* — водоохлаждаемый реактор; *3* — подложкодержатель; *4* — подставка; *5* — никелевый фланец; *6* — штуцер для отвода азота из кольцевой полости; *7* — манжет вала вращения; *8* — вал вращения; *9* — штуцер водородной продувки манжета; *10* — штуцер подачи парогазовой смеси; *11* — штуцеры подачи водорода; *12* — уплотнение; *13* — индуктор; *14* — кварцевый стакан; *15* — подложки

Вертикальный реактор, изображенный на рис. 98, состоит из кварцевой или стальной камеры *1*, в которой расположен графитовый подложкодержатель *3*. Под-

ложкодержатель представляет собой пирамиду или барабан с пазами для крепления подложек, частота вращения которого от 3 до 120 об/мин. Подложки *4* размещены в подложкодержателе с наклоном, предохраняющим их от выпадения из пазов. Нагрев подложкодержателя осуществляется от СВЧ-генератора индуктором *2*, отделенным от реакционной камеры кварцевым стаканом *9*.

Парогазовая смесь в вертикальном реакторе может подаваться снизу, сверху вдоль подложкодержателя (струйный ввод), или через специальный коллектор (кварцевая трубка с отверстиями), расположенный по высоте цилиндра (подложкодержателя), либо по касательной (тангенциальный ввод). При струйном вводе парогазовой смеси через патрубки в верхней торцевой поверхности реактора отмечается наличие в реакторе двух зон: зоны вихрей, образующихся при соударении потоков газа о торец подложкодержателя, и зоны направленного потока вдоль подложкодержателя. Вихри практически неуправляемы и объем камеры используется нерационально. Для снижения вихреобразований и улучшения аэродинамической характеристики подложкодержателя верхнюю часть его выполняют в виде конуса с плавным переходом к цилиндру.

При тангенциальном вводе потока в камеру структура потока определяется условиями ввода: скоростью подачи газа и углом наклона потока к оси камеры. По сравнению со струйным вводом условия перемешивания потока улучшаются благодаря сложным полям скоростей. Увеличивается интенсивность обмена в непосредственной близости от подложкодержателя.

Для вертикальных реакторов возможно использование ввода и вывода парогазовой смеси через два вертикальных перфорированных газовых коллектора: один — для подачи, другой — для отвода газовой смеси из зоны осаждения. Эти коллекторы расположены на диаметрально противоположных сторонах камеры по высоте подложкодержателя. Пьедестал с подложками равномерно вращается в потоках парогазовой смеси, обтекающих его на пути из питающего коллектора в коллектор сброса отработанных газов.

В металлических реакторах для усреднения состава парогазовой смеси по высоте многогранного подложкодержателя с размещенными на нем в несколько ярусов подложками парогазовая смесь подается снизу вверх струями, направленными в кольцевой зазор между горячей стенкой подложкодержателя и холодной стенкой реактора. Разброс толщины полученных слоев ± 3—5 % по высоте подложкодержателя достигается при радиальном вводе парогазовой смеси и вертикальных струях водорода, используемых для управления распределением концентрации газа вдоль поверхности подложкодержателя.

На рис. 98 изображен вертикальный реактор промышленной установки эпитаксиального наращивания УНЭС-2П-КА. Вертикальный реактор *2*, выполненный из коррозионно-стойкой стали, имеет верхний *1* и нижний *5* фланцы. Пластины *15* размещаются

в несколько ярусов на цилиндрическом подложкодержателе *3*. Во внутреннюю полость подложкодержателя вставлен кварцевый стакан *14*, внутри которого находится индуктор *13*. Подложкодержатель установлен на кварцевой подставке *4*, расположенной на плоском диске водоохлаждаемого вала вращения *8*. Кварцевая колба уплотняется с помощью кольцевой резиновой прокладки фланцем. Подача парогазовой смеси осуществляется снизу через штуцер, а отвод происходит через три водоохлаждаемых штуцера отвода реакционного газа. В нижнем фланце реактора через два штуцера *11* производится продувка кольцевой зоны между стенкой реакционной камеры и подложкодержателем. Для надежности уплотнений предусмотрена продувка азотом кольцевых полостей между двумя концентрическими резиновыми прокладками *12* верхнего и нижнего фланцев, а также манжета *7* вала вращения через штуцера.

Диапазон рабочих температур установки 900÷1300 °С. Регулирование температурного профиля по высоте подложкодержателя достигается изменением шага витков индуктора: повышение температуры — сжатием витков, а понижение — растяжением. Установка УНЭС-2П-КА предназначена для крупносерийного изготовления эпитаксиальных структур кремния, а также процессов газового травления подложек и получения покрытий из окисла и нитрида кремния.

Эпитаксиальные установки с горизонтальным реактором проще по конструкции (отсутствуют движущиеся части в реакторе), но отличаются высоким расходом рабочих газов и большим разбросом по толщине и удельному сопротивлению осаждаемых пленок. Установки с вертикальным реактором сложнее по конструкции, но обеспечивают самую высокую производительность и меньший разброс по толщине и удельному сопротивлению осаждаемых пленок.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОГО НАРАЩИВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА $A^{III}B^{V}$

Реакторы установок для наращивания эпитаксиальных слоев соединений $A^{III}B^{V}$ имеют ряд принципиальных отличий от описанных выше. При получении слоев GaAs, GaP, GaAsP и других соединений на основе Ga хлоридным и хлоридно-гидридным методами галлий переносится в зону осаждения в виде соединения GaCl, получаемого внутри реактора (рис. 99). Парогазовая смесь, из которой осаждаются эпитаксиальные структуры, образуется в результате смешения GaCl с гидридами As, P и легирующими компонентами в специальной зоне смешения, откуда поступает в зону осаждения. Реактор, изображенный на рис. 99, содержит соответственно три зоны; источника Ga (зона нагрева *I*), смешения (зона нагрева *II*) и наращивания (зона нагрева *III*). В источник Ga *1* по центральной трубе *2* подается HCl; получен-

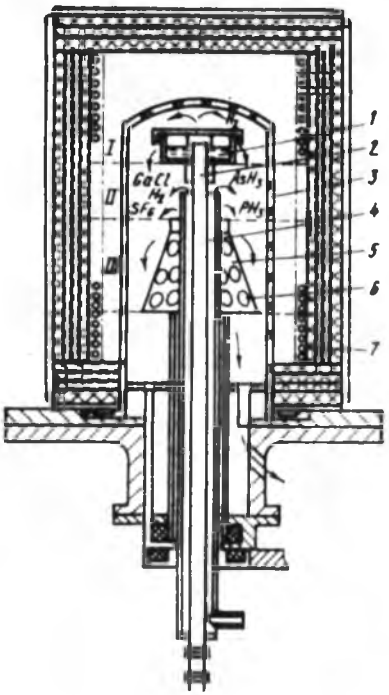


Рис. 99. Схема реактора для газовой эпитаксии соединений $A^{III}B^{V}$:

1 — источник жидкого галлия; *2* — трубопровод для подачи HCl; *3* — кварцевый реактор; *4* — трубопровод для подачи гидридов; *5* — подложкодержатель; *6* — подложки; *7* — нагреватель

ный в результате реакции GaCl выходит через окна источника в зону смешения. Туда же через трубопровод *4* подаются гидриды As или P и легирующий компонент SF_6. Пластины *6* расположены на кварцевом подложкодержателе *5*, вращающемся во время процесса. Установки для наращивания эпитаксиальных слоев соединений имеют максимальную температуру, как правило, в зоне источника Ga, переходную — в зоне смещения, причем, с определенным градиентом и, наконец, в зоне осаждения — температурную «площадку» по высоте всего подложкодержателя.

Конвективные тепловые потоки, возникающие в зазоре между реактором и нагревателем, создают определенные сложности при настройке температурных профилей. Для компенсации этого явления нагреватели разделяют на отдельные электрические зоны, имеющие самостоятельное электропитание и управление.

Реакторы обычно размещают в отдельных шкафах, которые содержат устройства оперативного управления, механизации (подъема, поворота), водоохлаждения и пылезащиты зоны загрузки пластин.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ (АСУТП) НАРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУР

Установки для наращивания эпитаксиальных слоев содержат большое количество объектов дискретного и аналогового управления в виде различных механизмов, регуляторов, блокировочных устройств и т. п. Управление установками осуществляется системами автоматического управления (САУ), в функции которых входят:

прием и анализ сигналов датчиков управления аналоговыми параметрами;

прием и анализ сигналов датчиков управления дискретными параметрами;

диагностика системы управления;
режим диалога «оператор — машина».

Для этого в составе САУ имеются устройства управления и согласования, микроЭВМ, блоки связи и обмена информацией, символьный дисплей и др. В качестве аналоговых параметров можно назвать температуру в реакторе, расходы некоторых газов. «Дискретными» параметрами являются команды управления запорными элементами газовых систем, двигательными и пневмоустройствами подъема колпаков, вращения подложкодержателя, воздуходувки, включения системы нагрева и т. д.

Важной функцией САУ является диагностика и сигнализация о неисправностях всех внутренних систем установки и блокировочных устройств.

Оператор имеет возможность получить информацию о работе установки в любой момент процесса.

При создании АСУ процесса требуется решение задачи по расчету функции скорости роста кремния в каждой точке поверхности подложек, размещенных на подложкодержателе, которая заключается в нахождении профилей, температур и скоростей в реакторе с учетом реальной геометрии самого реактора и подложкодержателя.

АСУТП эпитаксиального наращивания разработана применительно к промышленной установке УНЭС-2ПВ. Структурная схема АСУТП наращивания эпитаксиальных структур (рис. 100) вклю-

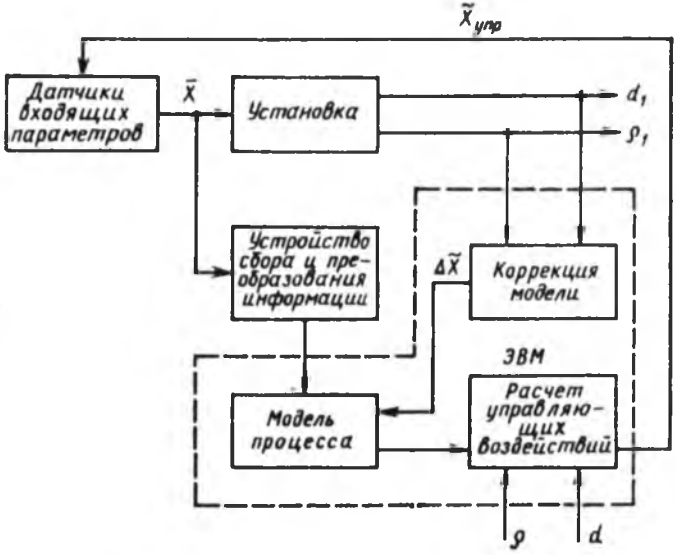


Рис. 100. Структурная схема АСУТП наращивания эпитаксиальных слоев:
d и ρ — заданные значения толщины и удельного электросопротивления пленки; d_i и ρ_i — выходные значения толщины и удельного электросопротивления пленки; $\tilde{x}_{упр}$ — управляющее воздействие; $\tilde{x}$ — текущее значение параметра; $\Delta\tilde{x}$ — разбаланс между текущим и заданным значениями параметра

Параметры датчиков для процесса эпитаксии

Наименование датчиков	Диапазон измерения	Максимальная погрешность, %
Датчики расхода:		
основного водорода, м³	1—4,5	±5
водорода через испаритель тетрахлорида кремния, л/ч	0—180	±5
гидридсодержащей смеси, л/ч	0—30	±5
концентрации паров тетрахлорида кремния в водороде (молярная доля), %	0,2—1	±10
Датчик мощности, отн. дел	0—100	±2

чает автоматизированную технологическую установку и управляющий комплекс.

Датчики технологических параметров процесса являются одним из основных приборов, работа которых в значительной мере определяет качество работы всей автоматизированной системы. Технические параметры датчиков, использованных в системе, приведены ниже в табл. 11.

Первые четыре датчика — термоанемометрического типа. В качестве чувствительных элементов в них использованы терморезисторы КМТ-14, включенные по мостовой схеме. Датчики высокочастотной мощности — индукционного типа с термовакуумным преобразователем ТВВ-4. Информацию, получаемую от датчика концентрации тетрахлорида кремния, используют для контроля за ходом процесса, а информацию с остальных датчиков — для управления процессом при помощи ЭВМ, обеспечивающей стабилизацию технологических параметров, и выводится на печать для контроля за ходом процесса. Кроме того, измеренные датчиками значения параметров подаются на приборы стойки поста контроля.

В результате внедрения АСУТП в производство достигнуто увеличение сквозного выхода годных эпитаксиальных структур по толщине и удельному сопротивлению с технологическим разбросом ±5 % на 7—3 %; сократилось в 5 раз число опытных (наладочных) процессов. Все это обусловило повышение эффективности производительности установки эпитаксиального наращивания на 15 %.

В дальнейшем возможна автоматизация системы управления группой из 10—20 установок эпитаксиального наращивания.

5. ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГАЗОВОЙ ЭПИТАКСИИ

В развитии оборудования для газовой эпитаксии можно выделить следующие направления:

совершенствование условий ввода газовых потоков в реактор;

повышение стерильности реакционных камер и газовых систем,

агрегатирование нескольких реакционных камер;

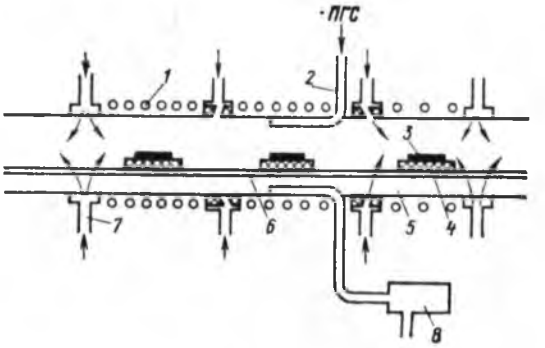


Рис. 101. Схема установки непрерывного действия для газовой эпитаксии:

1 — нагреватель; *2* — коллекторы для подачи и вывода парогазовой смеси (ПГС); *3* — подложки; *4* — подложкодержатель; *5* — реактор; *6* — транспортер; *7* — патрубки для подачи технологических газов; *8* — средство откачки

снижение рабочей температуры процессов;

создание комплексной системы автоматического управления процессами осаждения с автоматическим контролем и регулированием параметров осаждения с помощью ЭВМ;

разработка конструкций с объемным расположением подложек и их двусторонним нагревом;

разработка оборудования непрерывного действия.

За последние годы возрос интерес к оборудованию непрерывного действия для процессов эпитаксиального наращивания.

Установка непрерывного действия может представлять собой горизонтальную, открытую с обоих концов трубу для травления подложек и наращивания эпитаксиального слоя (рис. 101). Труба разделена на несколько температурных и газовых зон, через которые проходят подложки. Газовые барьеры создаются при помощи специальных устройств, четко разделяющих рабочие зоны и поддерживающих заданное направление газовых потоков. Внутрь трубы подается парогазовая смесь, служащая исходным материалом для наращивания эпитаксиального слоя.

Основные проблемы при реализации непрерывного метода — транспортирование изделий в камере, создание надежных газовых затворов между реакционными зонами, устройствами загрузки и выгрузки, обеспечение заданного профиля температур вдоль камеры, выбор материалов для носителей подложки, транспортного устройства и нагревателя для обеспечения минимального примесного фона.

Наиболее приемлемым решением является использование «спутников-носителей» подложек, перемещаемых с помощью транспортных средств или на газовой подушке.

Эффективным направлением повышения производительности и экономической целесообразности использования установок и дорогостоящих производственных площадей является агрегатирование нескольких реакционных камер (УНЭС-2). Одновременное проведение вспомогательных операций и процесса наращивания слоя в двух реакционных камерах, автоматизация и программирование основных операций позволили повысить производительность установки.

ГЛАВА 11

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ И ТРЕБОВАНИЯ К ОБОРУДОВАНИЮ

Метод жидкофазной эпитаксии в последнее десятилетие нашел широкое распространение в технологии полупроводниковых приборов, например при изготовлении люминесцентных и фотоэлектрических приборов на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$ и их твердых растворов или силовых полупроводниковых приборов на кремнии.

На рис. 102 приведена классификация методов жидкофазной эпитаксии. В ней за основу взят способ создания пересыщения в растворе-расплаве. Пересыщение при жидкофазной эпитаксии достигают охлаждением насыщенных растворов; подпиткой из твердой, жидкой и газовой фаз; испарением растворителей. По используемой аппаратуре варианты жидкофазной эпитаксии можно разделить на открытые и закрытые. В открытом варианте процесс протекает в токе инертного газа или водорода, а в закрытом — в отпаянной ампуле.

Процесс жидкофазной эпитаксии можно разделить на следующие этапы. Полупроводник, легирующая примесь и добавки (растворенные вещества) расплавляются в соответствующем легкоплавком, химически инертном к раствору и подложке веществе, чаще всего в металле (растворитель). Расплав выдерживают при температуре приготовления до полной гомогенизации. После этого раствор-расплав приводится в контакт с подложкой, смачивая ее. После установления теплового равновесия при температуре смачивания возможно в случае необходимости травление подложки за счет подъема температуры и создания ненасыщенного по растворенному веществу расплава или эпитаксиальный

Рис. 102. Классификация методов жидкофазной эпитаксии

рост растворенного вещества на подложку за счет снижения температуры и создания пересыщенного раствора-расплава. Примеси для получения легированных эпитаксиальных слоев вводятся в раствор-расплав во время приготовления шихты до ее расплавления или из газовой фазы. После осаждения эпитаксиального слоя избыточный раствор-расплав удаляют с подложки, затем подложку с осажденным слоем охлаждают до комнатной температуры.

Современная установка для жидкофазной эпитаксии должна обеспечить:

высокую производительность процесса;

диапазон рабочих температур в реакторе 450÷1573 К;

проведение процесса в чистой инертной или восстановительной атмосфере с содержанием кислорода менее $1 \cdot 10^{-4}$ %;

программированный автоматический подъем или снижение температуры раствора-расплава со скоростью 0,1—4,0 К/мин;

контакт свежеобразованной поверхности раствора-расплава, свободной от окисной пленки, с подложками и деконтацию использованного расплава;

длину рабочей тепловой зоны более 500 мм с распределением температуры ±0,25 °С;

вращение кассеты с подложками в случае вертикального расположения исходных подложек в кассете.

2. АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Установка жидкофазной эпитаксии, схема которой изображена на рис. 103, состоит из камеры или реактора для ограничения рабочего объема, нагревательного элемента (печь сопротивления *1*); системы прецизионного контроля и регулирования температуры, системы вакуумирования и газоснабжения; кассеты 3 для размещения подложек и раствора-расплава, устройств для вращения кассеты с подложками или перемещения элементов кассеты.

Наиболее распространенным методом получения эпитаксиальных слоев арсенида галлия из жидкой фазы является кристаллизация из переохлажденных насыщенных растворов в системе открытого типа. Для арсенида галлия интервал рабочих температур эпитаксии 973—1223 К. Для арсенида галлия наилучшим растворителем является галлий, обладающий низкой температурой плавления (302,5 К), высокой температурой кипения (2510 К) и низким давлением пара (0,01—0,6 Па в интервале рабочих температур). Влияние примесей сводится к минимуму, поскольку галлий является компонентом кристаллизуемого соединения. При этом применяют особо чистый галлий. В качестве материала контейнера используют графит, который не смачивается галлием и не растворяется в нем в интервале рабочих температур процесса жидкофазной эпитаксии. Различные конструкции аппаратуры для

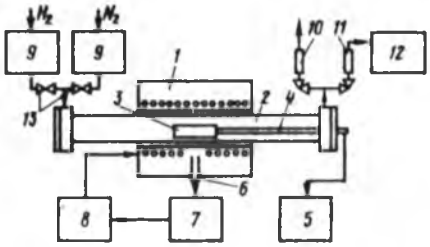


Рис. 103. Схема установки для жидкофазной эпитаксии:

1 — печь сопротивления; *2* — реактор; *3* — кассета для подложек и раствора-расплава; *4* — контрольная термопара; *5* — измерительный прибор; *6* — регулирующая термопара; *7* — регулятор мощности; *8* — источник питания; *9* — устройство для очистки газов; *10* — гидрозатвор; *11* — азотная ловушка; *12* — вакуумный насос; *13* — вентили

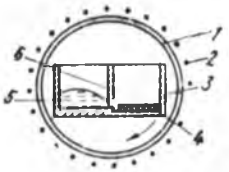


Рис. 104. Схема теплового узла установки для жидкофазной эпитаксии арсенида галлия:

1 — реактор; *2* — нагреватель; *3* — кассета; *4* — подложка; *5* — ячейка для расплава; *6* — перегородка

жидкофазной эпитаксии арсенида галлия показаны на рис. 104, 105.

Схема кассеты для разовой загрузки шихты для жидкофазной эпитаксии арсенида галлия приведена на рис. 104. Процесс жидкофазной эпитаксии осуществляется следующим образом. Графитовую кассету с размещенными на ней подложками арсенида галлия и шихтой расплава загружают в трубчатую водородную электропечь, снабженную приспособлением для наклона на требуемый угол. В процессе нагрева до заданной температуры шихта расплавляется. Шихта составляется таким образом, чтобы содержание арсенида галлия в расплавленном галлии было близким к равновесному, взятому из диаграммы состояния при заданной температуре. После небольшой выдержки угол наклона печи изменяют так, чтобы расплав переместился в отделение с подложкой и полностью ее покрыл.

Технолог получает возможность провести травление исходной подложки с целью удаления нарушенного слоя перед процессом жидкофазной эпитаксии повышением температуры на несколько градусов по сравнению с начальной, заданной для эпитаксии. При последующем контролируемом снижении температуры происходит пересыщение жидкой фазы и начинается рост эпитаксиального слоя арсенида галлия. Введением нужного количества легирующей добавки можно получить эпитаксиальные слои арсенида галлия с заданными свойствами.

Недостаток этой конструкции — низкая производительность процесса и возможность попадания на поверхность подложек поверхностного слоя расплава, содержащего оксиды.

Наибольшее распространение получила кассета для жидкофазной эпитаксии, состоящая из двух частей (рис. 105, *а*) — корпуса с углублениями *5* для расплавов I, II, III и IV и подвижной части кассеты *8* с пазами для подложек *7*. После расплавления

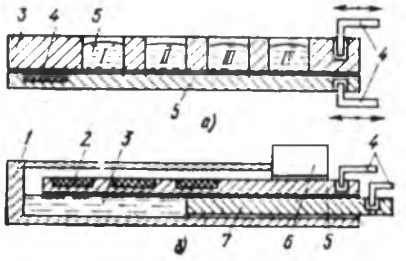


Рис. 105. Схемы конструкций кассет для жидкофазной эпитаксии:

а — для эпитаксиального наращивания многослойных структур; *б* — поршневого типа; *1* — корпус кассеты; *2* — подложки; *3* — расплавы; *4* — тяги для перемещения элементов кассеты; *5* — подвижный элемент кассеты с углублениями для подложек; *6* — груз; *7* — поршень

и достижения расплавом заданной температуры часть кассеты *8* продвигается, механически снимая слой возможных окислов с жидкого расплава, в результате чего на поверхность подложки поступает чистый расплав. Создав в кассете несколько ячеек *5* для различных расплавов, возможно получить многослойные структуры. Недостатками этой конструкции являются возможность попадания в расплав частиц конструкционного материала, из которого изготовлена кассета, при перемещениях ее частей и малая производительность. Конструкция поршневой кассеты для жидкофазной эпитаксии показана на рис. 105, *б*.

Процесс жидкофазной эпитаксии применяют для получения эпитаксиальных слоев кремния и германия, бинарных, тройных и более сложных систем. Последние перспективны во многих областях оптоэлектроники благодаря возможности регулирования в широком диапазоне ширины запрещенной зоны, термического коэффициента линейного расширения и параметра кристаллической решетки.

ГЛАВА 12

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ФОТОЛИТОГРАФИИ

Фотолитография является одним из основных процессов полупроводникового производства, который заключается в формировании рельефа в диэлектрических и металлических пленках, нанесенных на поверхность полупроводниковой пластины. Ее применяют для селективного удаления пленки двуокиси кремния над теми участками пластин, где должны быть созданы диффузионные структуры.

В основе фотолитографии лежит использование материалов, называемых фоторезистами, которые наносят на поверхность пластины для образования маски — тонкой защитной пленки нужной конфигурации.

Фоторезисты подразделяют на негативные и позитивные. Негативные фоторезисты под действием света образуют нерастворимые участки рисунка на поверхности пластины и после проявления остаются на ее поверхности. Позитивные фоторезисты, наоборот, под действием света образуют растворимые участки, при этом рисунок оригинала точно повторяется на поверхности пластины. Выбор фоторезиста зависит от используемого травителя и требований, предъявляемых к изделию.

Фотолитографические операции (рис. 106) можно разделить на четыре этапа (*I*—*IV*):

I — формирование фотослоя (нанесение и сушка фоторезиста);

II — формирование рельефа фотослоя — операция совмещения и экспонирования проявления и дубления фотослоя;

III — формирование рельефа в окисле и металле — травление окисла или металла;

IV — удаление использованного рельефного фотослоя.

Все операции обработки взаимозависимы и в то же время самостоятельны по специфике процесса и применяемому оборудованию. Выполнить основную цель фотолитографии — сформировать рельеф в окисле или металле — можно лишь при качественном проведении первых двух этапов процесса.

В настоящее время плотность размещения элементов в некоторых интегральных микросхемах составляет несколько сот элементов на мм^2, что достигается доведением размера линий и зазоров между ними до 1—3 мкм. Точность выполнения фотолитографических рисунков при этом находится в пределах десятых долей микрометра. Высокие требования к точности получаемых изобра-

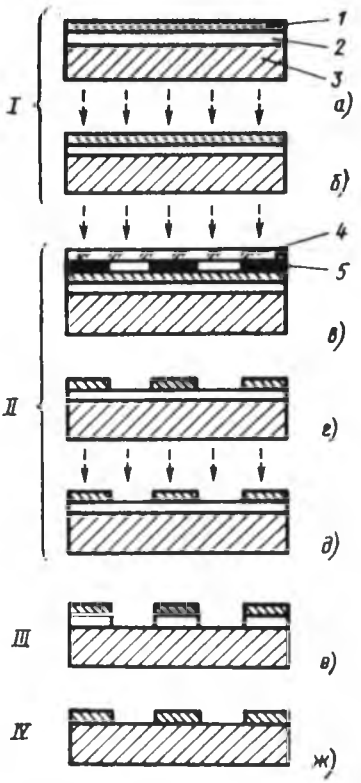


Рис. 106. Последовательность фотолитографических операций:

а — нанесение пленки фоторезиста; *б* — 1-я термообработка (сушка); *в* — совмещение и экспонирование; *г* — проявление; *д* — 2-я термообработка (дубление); *е* — травление окисла; *ж* — удаление фоторезиста;
1 — фоторезист; *2* — окисел; *3* — подложка; *4* — фотошаблон; *5* — фотоэмульсия шаблона

жений, а также к качеству маскирующего слоя (отсутствие проколов в фотомаске и, соответственно, двуокиси кремния) объясняют то особое внимание, которое уделяется не только самим процессам фотолитографии и оборудованию, но и вопросам эксплуатации оборудования, соблюдению вакуумной гигиены и климатических условий (1-й класс помещений по чистоте и 1-я категория помещений по климатическим условиям).

Наряду с этим на операции фотолитографии, многократно повторяющиеся в процессе производства, приходится более 50 % общего количества операций структурообразующей стадии производства. Поэтому к оборудованию фотолитографии предъявляются повышенные требования как в отношении качества проведения процесса, так и повышения его производительности. Стремление найти наилучшие приемы фотолитографической обработки привело к тому, что сегодня процессы фотолитографии отличаются достаточно большой вариантностью используемых промышленностью методов (табл. 12).

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ФОТОСЛОЯ

Оборудование для очистки пластин, которая предшествует формированию фотослоя, было рассмотрено в гл. 7, поэтому здесь на нем останавливаться не будем.

Из перечисленных в табл. 12 способов нанесения пленок фоторезиста в отечественной промышленности наиболее широко применяют метод центрифугирования, с помощью которого получают равномерный слой по всей пластине толщиной 0,2—2,0 мкм с отклонением от номинала менее ± 5 %.

Метод центрифугирования непрерывно совершенствуется. Так, в настоящее время разработан способ и оборудование для нанесения пленок фоторезиста на несколько пластин одновременно на одном шпинделе. Устройство для закрепления группы пластин на одном шпинделе показано на рис. 107. Это устройство позволило

Таблица 12. **Варианты обработки в фотолитографии**

Наименование операции	Этап обработки (рис. 106)	Методы обработки							
Нанесение пленки фоторезиста	*I*	Центрифугированием		Распылением			Окунанием	Нанесение валиком	
		по одной подложке	кассетное	При поступательном движении подложек	При вращательном движении подложек	В электростатическом поле			
Термообработка пленки фоторезиста	*I*	Конвективный нагрев				ИК-нагрев	СВЧ-нагрев		
		при атмосферном давлении		при давлении $5 \cdot 10^3$—$7 \cdot 10^4$ Па					
Совмещение и экспонирование	*II*	Контактная печать	Проекционная печать	Электронно-лучевая литография			Рентгенолитография		
				сканирующая		проекционная			
Проявление фотослоя	*II*	Иммерсионный		В дисперсной среде		Полив при центрифугировании			
		статических условиях	с перемешиванием						
Травление окисла	*III*	Химический (жидкостной)	Плазмохимический			Ионный			
Травление металла	*III*	Иммерсионный	В дисперной среде			Электрохимический			
Удаление фоторезиста	*IV*	Химический (жидкостной)	Плазмохимический	Термический		Фотохимический			

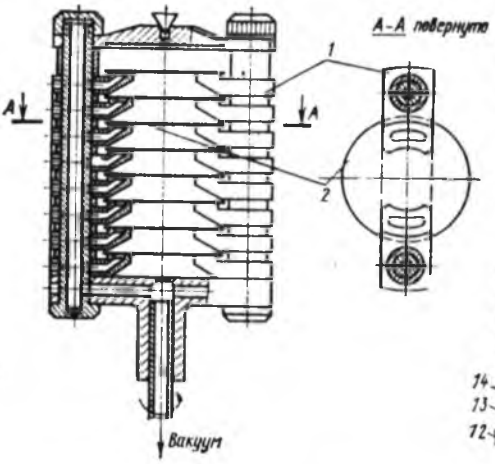


Рис. 107. Устройство для закрепления группы пластин на одном шпинделе:

1 — держатель; *2* — обрабатываемая пластина

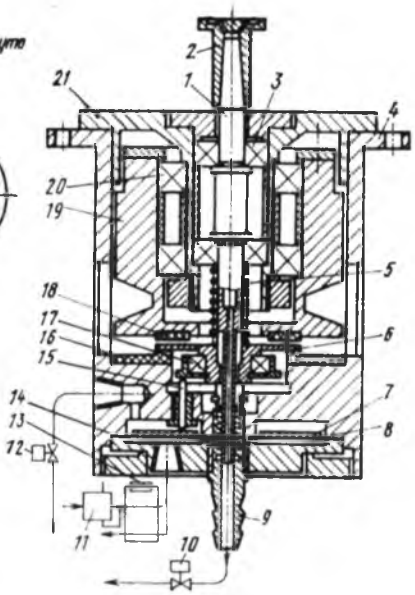


Рис. 108. Модуль центрифуги

не только многократно увеличить производительность, но и улучшить равномерность слоя по толщине, а также за счет взаимной экранировки пластин уменьшить число дефектов. Основным узлом установки является модуль центрифуги (рис. 108). Он состоит из шпинделя *1* и маховика *19*, вращающихся в подшипниках *3* и *20*, установленных на втулке *21*, жестко закрепленной в корпусе *4*. Корпус имеет окна для ременной передачи, соединяющей маховик с валом электродвигателя. На шпинделе расположен малоинерционный диск *6*, который может перемещаться вдоль него по шлицам. Для сцепления диска с маховиком служит мембрана *7*, поджимающая диск к фрикционному кольцу *18* через толкатели *15* и обойму на наружном кольце подшипника *17*. Полость *14* соединена с магистралью сжатого воздуха через управляемый клапан *13* и стабилизатор давления *11*. Нижний конец шпинделя входит в вакуумную камеру *9*, укрепленную в корпусе *4*, и не касается ее стенок. Вакуумная камера имеет лабиринтные уплотнения и соединена трубопроводом с вакуумным насосом через клапан *10*. На верхнем конце шпинделя установлен патрон *2*, на котором закрепляется подложка. Пружина *5* прижимает малоинерционный диск к тормозному кольцу *16*.

Сцепление малоинерционного диска с маховиком может осуществляться также сообщением полости *14* с атмосферой и соединением полости *8* с вакуумной системой через клапан *12*.

Принцип работы центрифуги по нанесению пленок фоторезиста на подложки заключается в следующем. Подложку уклады-

вают на патрон *2*, открывают клапан *10*, происходит отсос воздуха через вакуумную камеру *9* в центральном канале шпинделя и подложка плотно прижимается к поверхности патрона. От включенного электродвигателя через ременную передачу маховик разгоняется до заданной скорости. После того как на подложку подана доза раствора фоторезиста, включается клапан *13* и сжатый воздух, поступая в полость *14*, воздействует на кольцевую мембрану *7*, которая передает движение на толкатели *15*. Толкатели, упираясь в наружное кольцо подшипника *17*, сцепляют малоинерционный диск *6* с маховиком *19*. При этом происходит быстрый разгон шпинделя до заданной частоты вращения маховика. По истечении времени, необходимого для растекания и подсыхания фоторезистивной пленки, клапаном *13* выключается подача сжатого воздуха и под действием пружины *5* происходит расцепление малоинерционного диска с маховиком. Малоинерционный диск тормозится за счет трения о тормозное кольцо *16* и шпиндель останавливается. Затем закрывается клапан *10*, тем самым прекращается отсос воздуха из центрального канала шпинделя. Подложку с нанесенной на ней пленкой фоторезиста снимают с патрона *2*.

Особенность данной конструкции модуля центрифуги состоит в том, что достигается большое ускорение шпинделя в период пуска, обеспечивается стабильная угловая скорость вращения благодаря использованию большой массы вращающегося маховика.

Толщина нанесенного слоя фоторезиста зависит от его вязкости и угловой скорости вращения центрифуги. Приближенно она может быть определена по формуле

$$\delta = k\sqrt{\nu/\omega},$$

где δ — толщина слоя фоторезиста; k — коэффициент, учитывающий концентрацию фоторезиста; ν — вязкость; ω — угловая скорость вращения центрифуги.

Время разгона центрифуги влияет на равномерность толщины слоя фоторезиста и не должно превышать 0,1 с. В рассмотренном нами модуле центрифуги оно составляет 0,01—0,015 с.

Операция первой термообработки, завершающая процесс формирования фотослоя, имеет целью удаление из пленки летучих компонентов. Для обеспечения маскирующих свойств необходимо, чтобы эта операция не приводила к утонению или точечным разрывам слоя фоторезиста, которые могут возникнуть при быстром испарении растворителя.

Из вариантов термообработки, приведенных в табл. 12, наибольшее распространение получил ИК-нагрев. В качестве нагревателей применяют ИК-лампы или темные ИК-излучатели.

В установке типа УИС-1 (рис. 109) нагрев изделий осуществляется ИК-лампами с отражателями, смонтированными в рабочей камере. Камера с передней стороны имеет загрузочное окно, через которое на вращающуюся карусель устанавливают рабочую кассету. Установку помещают в пылезащитную камеру. Для обес-

Рис. 109. Внешний вид установки инфракрасной сушки фоторезиста УИС-1:
1 — загрузочное окно; *2* — пылезащитная камера; *3* — кассета; *4* — пульт управления

Рис. 110. Внешний вид агрегата формирования фотослоя АФФ-1

печения возможности подбора наиболее эффективного режима сушки частоту вращения карусели можно регулировать от 5 до 20 об/мин и температуру — от 50 до 200 °С. В современных линиях фотолитографии типа «Лада-125» применяют конвейерные печи с темными источниками ИК-излучения в виде тонкой токопроводящей пленки, нанесенной на лист кварцевого стекла. Сушку в таких печах производят за 2,5—5 мин при непрерывной продувке печи азотом. Для подбора режима скорость перемещения конвейера и температуру регулируют.

Перспективной является термокомпрессионная сушка фоторезиста, которая представляет собой термообработку подложек в герметично закрытой камере в инертной атмосфере (например, азоте) и повышенном давлении порядка $5 \cdot 10^5$—$7 \cdot 10^5$ Па. При этом замедляется истечение паров растворителя, изменяются параметры обработки пленки и, соответственно, ее свойства.

Термокомпрессионная обработка позволяет исключить дубление (вторую термообработку) пленки, улучшить ее качество и облегчить удаление фоторезиста. Этот процесс реализован в агрегате формирования фотослоя типа АФФ-1, внешний вид которого показан на рис. 110.

В пылезащитной камере *4* на столе *2* смонтирована центрифуга *3* с этажерочным устройством для нанесения фоторезиста и размещены три камеры *5* для термокомпрессионной сушки. Число камер выбрано исходя из длительности обработки изделий на операциях. В столе установки размещены пневмо- и гидроавтоматика. Системы электропитания и управления смонтированы в специальном шкафу *1*.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ И ЭКСПОНИРОВАНИЯ

Обычная контактная фотолитография с применением установок совмещения и экспонирования уже в течение длительного времени является основным технологическим методом производства интегральных микросхем. Во всех трех вариантах этого метода (с плотным контактом, с мягким прижимом и с зазором) фотошаблон расположен рядом с пластиной, а за ним помещен источник ультрафиолетового света. Разрешающая способность очень высокая только в том случае, если шаблон и пластина находятся в плотном контакте, но при этом возникает много дефектов, например повреждение твердыми частицами, отслаивание, сморщивание и перенос пленок резиста, царапание шаблонов и т. д. Схема совмещения показана на рис. 111, *а*, а схема контактного экспонирования — на рис. 111, *б*. Если прижим мягкий, то эти дефекты сводятся к минимуму, но разрешающая способность ухудшается.

Контактная фотолитография с зазором (рис. 111, *в*), при которой фотошаблон и пластина расположены на некотором расстоянии друг от друга, позволяет еще больше уменьшить количество дефектов, но при этом происходит дальнейшее ухудшение разрешающей способности. При использовании фотолитографии с зазором форма элементов может искажаться в результате дифракции проходящего через шаблон света. Величина этих искажений зависит от фактического изменения зазора по площади пластины. Для того, чтобы избавиться от этих трудностей, была предложена проекционная фотолитография (рис. 112). При получении изображения методом проекционной фотолитографии пластину и шаблон размещают на значительном расстоянии друг от друга. Промышленное применение метода началось с использования статических систем с линзами, предназначенными для одновременного экспонирования всей площади пластины. Однако

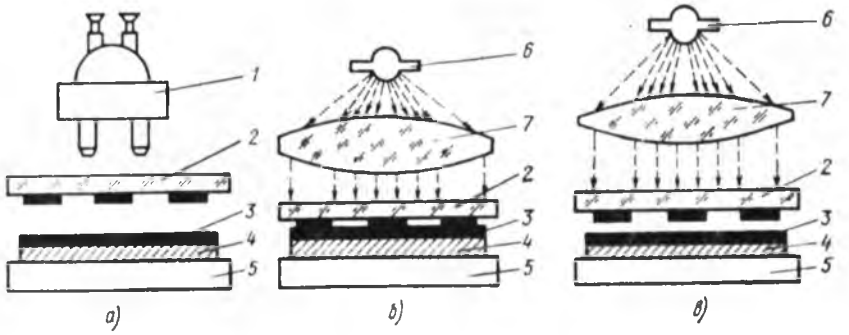


Рис. 111. Схема совмещения и экспонирования:

а — совмещения; *б* — контактного экспонирования; *в* — экспонирования с зазором; *1* — микроскоп; *2* — фотошаблон; *3* — фоторезист; *4* — подложка; *5* — столик; *6* — источник излучения; *7* — конденсор

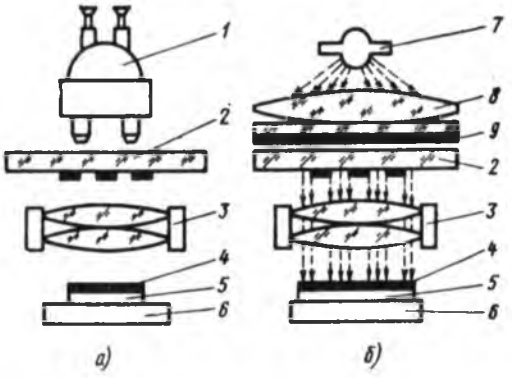


Рис. 112. Схема проекционной фотолитографии:
а — совмещения; *б* — экспонирования;
1 — микроскоп; *2* — фотошаблон; *3* — объектив; *4* — фоторезист; *5* — подложка; *6* — столик; *7* — источник излучения; *8* — конденсор; *9* — фильтр

дальнейшее развитие метода проекционной фотолитографии было ограничено из-за невозможности изготовления системы преломляющей оптики, позволяющей обрабатывать пластины диаметром более 60 мм.

Шаблоны для данной системы ничем не отличаются от шаблонов, применяемых для контактной фотолитографии. Дальнейшим ее развитием стала проекционная фотолитография с многократной шаговой репродукцией. По этому способу небольшое изображение создается на поверхности пластины с помощью шаблона, изготовленного методом фотокомпозиции и увеличенного в 2, 4, 5 или 10 раз по сравнению с изображением на пластине. Процесс затем повторяют многократно, так, чтобы изображения покрывали всю поверхность пластины. При использовании для экспозиций дальнего ультрафиолетового излучения разрешающая способность повышается.

Рассмотрим схему установки совмещения и контактного экспонирования (рис. 113). Все механизмы и устройства, обеспечивающие функционирование установки, можно объединить в пять основных взаимосвязанных конструктивных узлов:

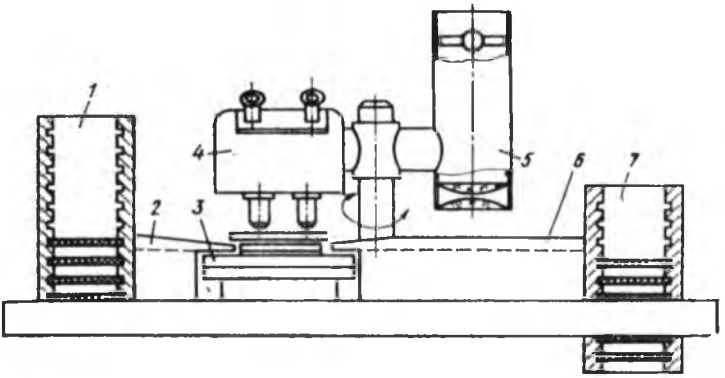


Рис. 113. Схема установки совмещения и контактного экспонирования:
1 — подающая кассета; *2*, *6* — транспортировочный канал; *3* — устройство совмещения; *4* — устройство контроля процесса совмещения; *5* — осветительное устройство; *7* — приемная кассета

система подачи полупроводниковой пластины из стандартной кассеты на рабочую позицию и обратно (позиции *1—2*, *6—7*);

устройство совмещения топологии фотошаблона и пластины (позиция *3*);

устройство контроля процесса совмещения (позиция *4*);

осветительное устройство, обеспечивающее процесс экспонирования (позиция *5*);

система управления процессом.

Подачу пластин в рабочую зону в большинстве известных установок совмещения и экспонирования, в том числе и с полуавтоматическим рабочим циклом, осуществляют вручную. Это снижает производительность установки и усложняет конструкцию устройства совмещения, так как для обеспечения доступа к месту фиксации пластины в момент ее установки оно должно быть выведено из-под фотошаблона.

При разработке полностью автоматизированных участков фотолитографии особенно большое значение приобретают вопросы внутриагрегатной и межоперационной транспортировки. От технического уровня их решения существенно зависит производительность установки и возможность повышения процента выхода годных изделий за счет исключения загрязнения пластин, обусловленного их контактом с оператором, и значительного сокращения вероятности их поломки при транспортировке, что особенно важно при обработке пластин большого диаметра.

Универсальный механизм поштучной выдачи пластин из поточной линии обработки пластин «Лада-125» показан на рис. 114.

Кассету с 25 обрабатываемыми пластинами помещают на основании *22*. Перемещение основания с кассетой верх на каждый шаг осуществляется от электродвигателя *4* через однооборотный механизм *6—8* ходовым винтом *11* с гайкой *5*. Верхнее и нижнее положения основания с кассетой ограничиваются микровыключателями *13* и *21*. Толкатель *2* выдвигает пластины из кассеты на лоток *18*.

Устройство совмещения является основным механическим узлом установки, определяющим возможность практической реализации предельных характеристик оборудования. Его функциональное назначение заключается во взаимной ориентации полу-

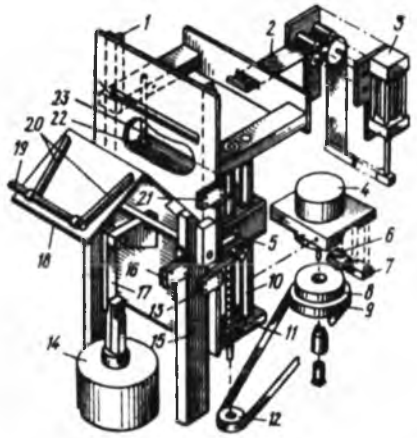


Рис. 114. Универсальный механизм поштучной выдачи пластин:

1, *10*, *20* — направляющие; *2*, *6* — толкатели; *3*, *14* — пневмоцилиндры; *4* — электродвигатель; *5* — гайка; *7*, *13*, *16*, *21* — микропереключатели; *8* — шкив; *9* — ремень; *11* — ходовой винт; *12* — шкив; *15* — стойка; *17* — тяга; *18* — пневматический лоток; *19* — фотоприемник; *22* — основание; *23* — штанга

проводниковой пластины и фотошаблона и в создании необходимого контакта или зазора между ними в процессе экспонирования.

Устройство объединяет механизмы крепления фотошаблона, крепления и вертикального перемещения пластины и манипулятор.

Базирование фотошаблона в держателе осуществляется по трем жестким упорам, к которым он поджимается подпружиненными прижимами и закрепляется механически или вакуумным присосом. Для обеспечения доступа к рабочей зоне при установке полупроводниковой пластины, наладке или ремонте возможен поворот держателя с фотошаблоном на 30° относительно горизонтальной оси. В рабочем положении держатель надежно фиксируется вакуумным присосом. В ряде конструкций шаблонодержатель можно перемещать в двух взаимно перпендикулярных направлениях на величину 0,5—2 мм и поворачивать на угол 1—5°.

Для установки рабочей поверхности полупроводниковой пластины параллельно плоскости фотошаблона и обеспечения плотного контакта между ними при экспонировании служит механизм вертикальных перемещений. Пластина устанавливается в механизме и закрепляется с помощью вакуума на столике со сферической опорой. Сферическая опора на воздушной подушке толщиной 10—15 мкм гарантирует автоматическую ориентацию рабочей поверхности пластины при ее контакте с плоскостью фотошаблона. В этом положении опора фиксируется и при дальнейшем перемещении столика в вертикальном направлении рабочие поверхности пластины и фотошаблона остаются параллельными.

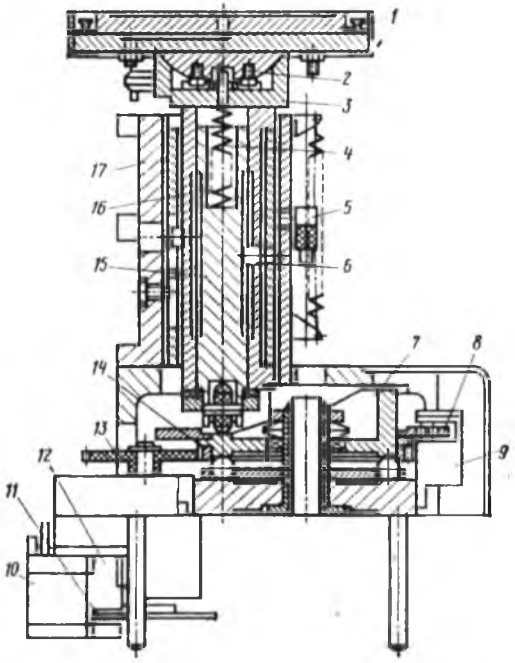


Рис. 115. Механизм вертикальных перемещений полупроводниковой пластины установки ЭМ-576

К точности механизма вертикальных перемещений предъявляют высокие требования. Пример конструктивного оформления этого механизма в установке совмещения и экспонирования типа ЭМ-576 показан на рис. 115. В этой установке механизм вертикальных перемещений служит для

подъема или опускания полупроводниковых пластин с целью создания плотного контакта или заданного зазора с фотошаблоном. Вертикальное перемещение полупроводниковой пластины, находящейся в каретке *1* механизма транспортировки, осуществляется через чашку *3* и сферу *2* ползуном *16*, который приводится в действие кулачком *7* от штока *15* с пружиной *4*. В свою очередь кулачок *7* получает перемещение от шестерен *13* и *14* привода *10*.

Кулачок *7* имеет косой срез и восемь горизонтальных площадок, образующих между полупроводниковой пластиной и фотошаблоном различные зазоры (от 0 до 50 мкм). При набегании кулачка на ролик штока *15* происходит его вертикальное перемещение, а вместе с ним и ползуна *16* по направляющим скольжения относительно корпуса *17* механизма. Шток *15* фиксируется в ползуне *16* в определенном положении фиксатором *6*, срабатывающим от пневмопривода *5*.

На шестерне *14* закреплен диск *8*, имеющий несколько определенным образом расположенных отверстий, являющихся кодом для датчика *9*. Датчик *9*, срабатывая, подает сигнал об остановке кулачка *7*. Каждое положение кулачка контролируется датчиком *12* с помощью диска *11*, связанного с механическим приводом *10*.

Рабочий зазор между полупроводниковой пластиной и фотошаблоном настраивают, передвигая планку, находящуюся на диске *11*.

Механизм вертикальных перемещений установлен на диске манипулятора, который можно поворачивать в направляющих подшипниках вокруг вертикальной оси для устранения угловой ошибки совмещения. В свою очередь диск с механизмом вертикальных перемещений установлен на плите манипулятора, имеющей возможность перемещаться по двум взаимно перпендику-

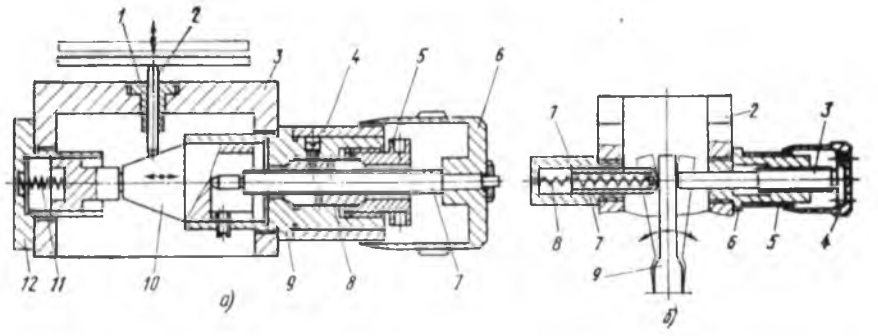
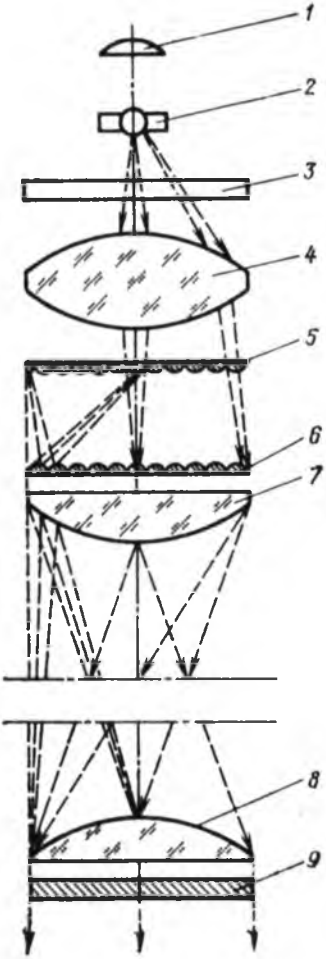


Рис. 116. Конструкции устройств для осуществления прецизионных перемещений:

а — линейных: *1* — втулка; *2* — штифт; *3* — корпус; *4* — втулка со шкалой; *5* — поджимная втулка; *6* — отсчетный барабан; *7* — микровинт; *8* — втулка; *9* — опорная втулка; *10* — ползун; *11* — пружина; *12* — упорная втулка;
б — угловых: *1* — опорная втулка; *2* — несущая колодка; *3* — винт; *4* — отсчетный барабан; *5* — втулка со шкалой; *6* — гайка; *7* — цилиндр; *8* — пружина; *9* — рычаг

лярным координатам X и Y в прецизионных направляющих. Эти движения дают возможность оператору совместить рисунки на пластине и фотошаблоне. Конструкции устройств для осуществления прецизионных линейных и угловых перемещений показаны на рис. 116. Контроль за точностью совмещения осуществляют по совпадению реперных знаков через одно- или двухпольный оптический микроскоп. После завершения операции микроскоп отводят в сторону и заменяют осветительным устройством, которое имеет источник ультрафиолетового излучения, например, ртутно-кварцевую лампу высокого давления типа ДРШ-250 или ДРШ-500, конденсор и затвор, объединенные в единый блок.

Равномерная освещенность по полю экспонирования — одно из основных условий качественного выполнения экспонирования. В современных установках диаметр поля экспонирования должен быть не менее 75—100 мм, а разброс освещенности по полю не должен превышать 5—10 %. Столь высокие параметры системы освещения обеспечиваются системами кварцевых конденсоров, содержащих до пяти линз. Это так называемый растровый осветитель, схема которого показана на рис. 117.



Источник света *2*, помещенный в фокусе сферического зеркала *1*, отделен от системы проекционных линз тепловым фильтром *3*, через конденсор *4* и линзовый растр *5* и *6* он проектируется линзами *7* и *8* в плоскость фотошаблона *9*.

Проекция источника света в виде накладывающихся друг на друга световых пятен, по количеству соответствующих количеству растровых линз, обеспечивает необходимую равномерность освещения фотошаблона.

Величину светового потока, необходимого для обеспечения экспонирования пластин, в пределах от 1 с до 2 мин регулируют с помощью электромагнитного затвора. Время срабатывания шторки затвора должно находиться в пределах 0,05—0,1 с, а относительная погрешность — не превышать 10 %.

Контактная фотолитография в настоящее время вытесняется электронолучевой литографией, так как у по-

Рис. 117. Схема растрового осветителя

следней меньший уровень дефектов схем и нет повреждений фотошаблонов, происходящих при механическом контакте шаблон — подложка.

Электронно-лучевую литографию стремятся также применить для создания фотошаблонов для оптической литографии с малыми размерами элементов. Это вызвано тем, что резко (более чем в 100 раз) сокращается время, необходимое для изготовления сложного фотошаблона на электронно-лучевой установке по сравнению с использованием механического генератора рисунка. Электронолитография, основанная на передаче топологии путем прямого вычерчивания рисунка на пластине, имеет ряд несомненных преимуществ перед фотолитографией, прежде всего в части реально достигнутого разрешения 0,2—0,3 мкм и снижению количества дефектов, поскольку экспонирование происходит в вакууме. Практическое применение нашли варианты электронно-лучевой литографии с растровым и векторным сканированием.

При растровом методе сканирования стол перемещается с постоянной скоростью в направлении одной из координат, в то время как электронный луч сканирует в перпендикулярном направлении. Однако метод обеспечивает высокую скорость экспонирования только в том случае, если ширина линий не менее 2 мкм. При размерах линий 1 мкм и менее (и соответственно меньшем диаметре пучка) время экспонирования возрастает в 4 раза. Поэтому промышленное применение подобного рода установок становится нецелесообразным. В установках, работающих по методу растрового сканирования, пучок отклоняется по полосе шириной 256 или 128 мкм. Полосы стыкуются при движении координатного стола, положение которого контролируется лазерным интерферометром. Ошибка положения стола исправляется отклонением электронного пучка. Для этих установок достигаемая точность ширины линий 0,2 мкм, тактовая частота — 20 МГц, средняя скорость движения стола — 2 см/с. Производительность — примерно одна пластина диаметром 100 мм за 50 мин или одна пластина диаметром 75 мм за 35 мин.

При векторном сканировании обработка всей поверхности пластины осуществляется в результате шагового перемещения стола с отклонением и модулированием электронного луча над подложкой такими, чтобы получить требуемое изображение топологии прибора на поле от 0,5×0,5 мм² до 2×2 мм². Системы векторного сканирования могут быть с круглой и переменной формой электронного пучка. Последние являются наиболее производительными и перспективными для непосредственного экспонирования полупроводниковых пластин. Данные о топологии прибора, внесенные в память ЭВМ, преобразуются в сигналы, питающие бланкирующие (запирающие луч), и сканирующие системы. Формы вычерчиваемых фигур ограничены прямоугольниками, треугольниками и трапециями; окружности и кольца аппроксимируются с помощью трапецеидальных фигур.

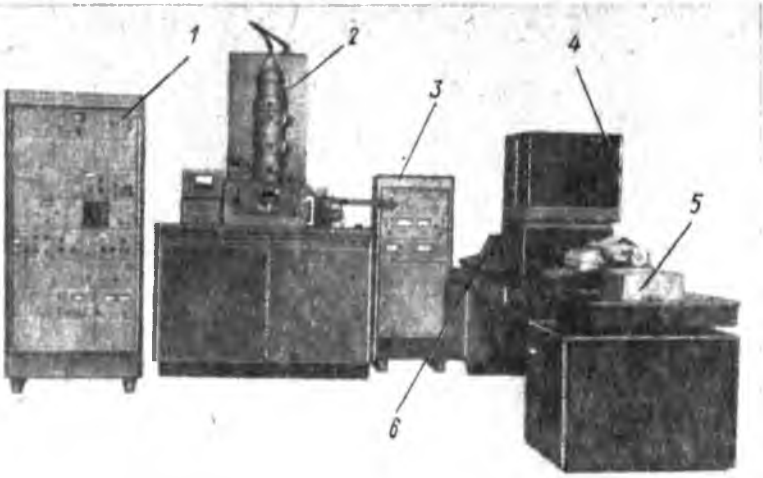


Рис. 118. Электронно-лучевая установка типа «Эра»:
1 — шкаф питания и управления; *2* — электронно-лучевая установка; *3* — шкаф управления; *4* — управляющая микроЭВМ; *5* — устройство ввода—вывода информации; *6* — пульт управления ЭВМ

Внешний вид установки и ее схема показаны соответственно на рис. 118 и 119. Для того чтобы непосредственно экспонировать пластины, необходим хорошо разработанный метод совмещения. Обычно совмещение выполняется по реперным знакам электронным путем регистрацией сигнала от вторичных электронов.

Знаки, например, могут располагаться в трех углах поля экспонирования в каждом кристалле, положение их определяется прежде, чем начинается экспонирование. При этом компенсируются три параметра: дрейф положения пучка, амплитуда сканирования (масштаб, включая компенсацию по высоте) и направление сканирования. Время, затрачиваемое на отыскание реперных знаков и выполнение корректировок, обычно менее 1 с.

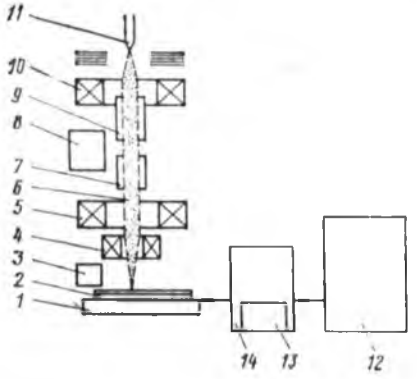


Рис. 119. Схема электронно-лучевой установки:
1 — координатный стол; *2* — резист; *3* — система совмещения; *4* — отклоняющая система; *5* — линза объективная; *6* — электронный луч; *7* — устройство формирования размеров луча; *8* — система управления положением луча; *9* — бланкирующее устройство; *10* — линза конденсаторная; *11* — катод; *12* — система проектирования микросхем («Кулон»); *13* — ЭВМ; *14* — система управления установкой

Таблица 13. **Сравнительные технико-экономические характеристики различных методов литографии**

Виды литографии	Методы литографии	Минимальная ширина линии, мкм	Точность совмещения, мкм	Плотность дефектов, $см^2$	Производительность, пл/ч
Фотолитография	Контактная фотолитография	1	±0125	2,5	60
	Проекционная фотолитография 1:1	2,5—3	±1	1	60
	Проекционная фотолитография с уменьшением	1—1,5	±0,25	1	60
	Проекционная фотолитография с мультипликацией уменьшенного изображения	1—2	±0,25—0,5	1	10—60
Электронная	Сканирующая электронолитография	0,2—1	±0,05—0,1	0,5	От 1—2 до 22
	Проекционная электронолитография	1—2	0,2	0,5	60—120
Рентгеновский	Рентгенолитография	0,5—2	±0,1—0,25	1	10—60

Перечень существующих и применяемых в настоящее время методов литографии и сравнительные технико-экономические характеристики различных методов, приведены в табл. 13.

4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЯВЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

Группа операций фотолитографии завершается проявлением рисунка и термообработкой (дублением) пленки. Многообразие приемов проявления фоторезиста характеризуется различиями в способе подачи реагента на обрабатываемую поверхность. Использование того или другого способа определяет степень интенсификации процесса проявления, т. е. повышение коэффициента массопередачи.

Иммерсионный способ (погружение с перемешиванием раствора) дает возможность создать простое, надежное и высокопроизводительное автоматизированное оборудование с групповой обработкой изделий в кассетах. Однако проявление методом подачи проявляющегося раствора распылением (пульверизацией) обладает преимуществом в отношении интенсификации процесса и экономии реагентов. Поэтому основным способом проявления, используемым в современном оборудовании, является дисперсионное распыление. Оно применено, например, в полуавтомате проявления типа ППФ-2. Он предназначен для химического раство-

рения пленки фоторезиста в распыленном до мелкодисперсного состояния растворе щелочи с последующей промывкой и сушкой обработанных полупроводниковых пластин. Но на нем можно производить и другие технохимические операции, такие, как травление окисла и травление металла с применением холодных травителей на основе соляной, азотной и плавиковой кислот.

Конструктивно полуавтомат размещен в унифицированной пылезащитной камере, на которой установлен кожух с блоком управления блоком питания и регулятором угловой скорости вращения центрифуги. Обработка полупроводниковых пластин производится в герметически закрытой камере-реакторе на вращающейся центрифуге, где они удерживаются прижимами. Вращение обеспечивает равномерную химическую обработку пластин, интенсифицирует процесс и способствует лучшему удалению продуктов реакции.

Пневмогидравлическая схема, поясняющая принцип действия полуавтомата, показана на рис 120. Камера-реактор представляет собой емкость, состоящую из основания и крышки *1*, изготовленных из оргстекла. Основание камеры установлено и закреплено на плите стола пылезащитной камеры. Через его дно проходит вертикальный вал привода вращения центрифуги *5*, который уплотняется воздушным затвором *6*. Вертикальный вал получает вращение от электродвигателя постоянного тока *8* с тахогенератором. Кроме того, в дне имеются сливные отверстия *7*, слу-

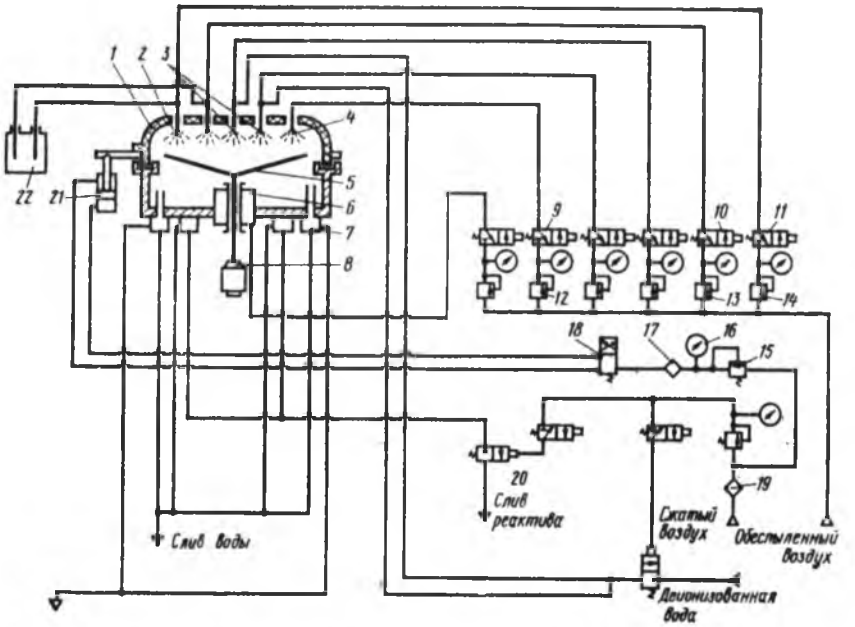


Рис. 120. Пневмогидравлическая схема полуавтомата ППФ-2

жащие для удаления отходов при химической обработке полупроводниковых пластин. Крышка камеры приподнимается с помощью пневмоцилиндра *21*. При проявлении фоторезиста, промывке и сушке пластин крышка герметично уплотняется с основанием камеры и одновременно блокируется до окончания процесса. Сверху через крышку введено пять форсунок: для распыления проявляющего вещества *2*, для деионизованной воды *3* и для подачи очищенного сжатого воздуха *4*. Блокировка не позволяет подавать химические вещества в камеру при поднятой крышке. Крышку можно открыть только при одновременном нажатии двух кнопок на пульте управления.

Для распыления химического реактива применяют только очищенный сжатый воздух, используемый также для подъема и опускания крышки *1* камеры. Струя сжатого воздуха, проходя по трубопроводу через стабилизаторы давления *13*, *14* и электропневматические вентили *10*, *11*, попадает в форсунку *2*, засасывает из резервуара *22* проявляющее вещество и распыляет его.

Для привода в действие пневмоцилиндра *21* и крышки камеры *1* сжатый воздух проходит по трубопроводу через воздушный фильтр *19*, стабилизатор давления *15*, маслораспылитель *17*, воздухораспределитель *18* и попадает в одну из полостей пневмоцилиндра *21*. Давление воздуха контролируется манометром *16*. Деионизованная вода через клапан агрессивных сред *20* непосредственно подается в форсунки *3*. Подсушку полупроводниковых пластин после обработки фоторезиста производят очищенным сжатым воздухом через форсунку *4*, в которую он подается из магистрали по трубопроводам, пройдя предварительно стабилизатор давления *12* и электропневматический вентиль *9*.

Схема электрооборудования полуавтомата обеспечивает его работу в двух режимах: наладочном и полуавтоматическом. При работе в наладочном режиме возможно независимое включение электромагнитных клапанов, следовательно, подача химических реактивов (в том числе и воды), а также сушка и слив для удаления продуктов реакции и промывки. Блокировка действует и в наладочном режиме и не допускает одновременную подачу химических реактивов и подъем крышки камеры проявления.

При работе в автоматическом режиме по реле времени устанавливают частоту вращения центрифуги, а также время подачи реактива, воды и воздуха и включают полуавтомат. Работа полуавтомата в этом режиме начинается с подачи воздуха в затвор, далее с частотой 100—200 об/мин начинает вращаться центрифуга, а затем происходит последовательная подача реактива, воды и воздуха. Через определенное время после подачи реактива включается слив и продукты химической обработки удаляются из камеры в канализацию. Одновременно с окончанием подачи воды для промывки пластин электродвигатель привода центрифуги переключается на частоту вращения $2{,}5—3 \cdot 10^3$ об/мин, при которой осуществляются сброс капель воды и сушка. По истечении времени сушки полуавтомат выключается.

5. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТРАВЛЕНИЯ ОКИСЛА И МЕТАЛЛА

Операция травления завершает процесс формирования топологического рельефа на обрабатываемой подложке (см. табл. 12). Так же, как и в предыдущих случаях, возможна широкая вариантность методов обработки, обусловливающих применение различных видов оборудования для достижения одного и того же результата.

Так, например, травить окисел можно химическим путем в жидкости или в плазме, но можно удалять и химически нейтральными ионами или, наконец, использовать совместное воздействие того и другого фактора. Для жидкостного травления окисла используют те же или аналогичные установки, что и для операций очистки, рассмотренные в гл. 7. Это установки типа ПВХО-ГК60-1, ПВХО-ПК60-1 для обработки в объеме травителя и рассмотренный в предыдущем параграфе полуавтомат типа ППФ-2 для обработки распыленным реагентом.

В последнее время для операций травления окисла и металла стали широко применять плазмохимические процессы. При этом чаще всего используют реактивное ионно-плазменное травление, отличающееся тем, что в процессе его применения осуществляется совместное воздействие физического распыления бомбардировкой положительными молекулярными ионами, и химических реакций в плазме разряда вещества обрабатываемой подложки со свободными атомами и радикалами.

Процессы реактивного ионно-плазменного травления осуществляются в основном в двухэлектродных ВЧ-системах. Если обрабатываемые изделия размещены на потенциальном (ВЧ) электроде, то такая система называется ВЧ-диодной системой с катодной связью (рис. 121), а если на заземленном электроде (аноде), то — ВЧ-диодной системой с анодной связью (рис. 80).

Реакторы могут быть объемными, если обрабатываемые изделия закреплены на стенках цилиндрического или конического электрода, или планарными, если они размещены на плоскости горизонтально расположенного электрода.

В установках с объемными реакторами типа «Плазма-600» (рис. 82) обычно используют безэлектродный способ возбуждения плазмы, как правило, цилиндрическим индуктором, расположенным вокруг трубчатого реактора. Основное их назначение — очистка поверхности и удаление фоторезиста, хотя в ряде случаев они могут быть успешно использованы и для травления окисла. В установках

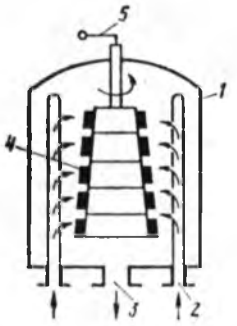


Рис. 121. ВЧ-диодная система с катодной связью:
1 — вакуумная камера; *2* — патрубки подачи реагента; *3* — выход реагента; *4* — подложки; *5* — токоподвод от ВЧ-генератора

с планарным реактором характерно использование емкостного возбуждения плазмы с помощью системы электродов, на одном из которых расположены подложки.

Установки с планарными реакторами и двухэлектродными ВЧ-системами возбуждения разряда позволяют эффективно использовать плазму для травления двуокиси кремния и алюминия с высоким разрешением.

Диодные ВЧ-системы с анодной связью, в которых подложки располагаются на заземленном электроде и подвергаются воздействию ионов с меньшей энергией, чем в системах с катодной связью, получили более широкое распространение.

Анализ принципиальных схем конструкций плазмохимических реакторов на основе модели процесса плазмохимического удаления материалов дает основание утверждать, что наиболее перспективным направлением в разработке реакторов для травления окисла и металлов является совершенствование конструкции планарных реакторов со стабилизацией температуры, анодным расположением обрабатываемых изделий и радиальным распределением газового потока вдоль анода.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Основной технологической проблемой полупроводникового производства и микроэлектроники является освоение массового выпуска приборов с субмикронными размерами элементов. Эта проблема связана с решением двух задач:

разработкой и освоением процессов и оборудования, позволяющих создавать на защитных резистивных масках топологические рисунки с субмикронными размерами;

разработкой и освоением процессов и оборудования для травления с высоким разрешением, обеспечивающих перенос полученных рисунков на слои рабочих материалов.

Решение первой задачи связано с устранением принципиальных ограничений для существующих систем экспонирования, заключающихся в дифракции света. Это ограничение, связанное с длиной волны света, относится ко всем методам фотопечати. Поэтому ведутся интенсивные разработки систем экспонирования с более коротковолновыми источниками облучения резиста.

В настоящее время чаще всего используют методы электронно-лучевой и оптической литографии с непосредственной мультирепродукцией изображения на пластине, но в дальнейшем наиболее мощным перспективным технологическим методом может оказаться рентгенолитография.

Система для рентгенолитографии напоминает обычную фотолитографическую систему с использованием ультрафиолетового излучения. Система имеет источник излучения, шаблонов и пластину, покрытую фоторезистом (рис. 122). Рентгеновское излучение должно быть достаточно мягким для того, чтобы фоторе-

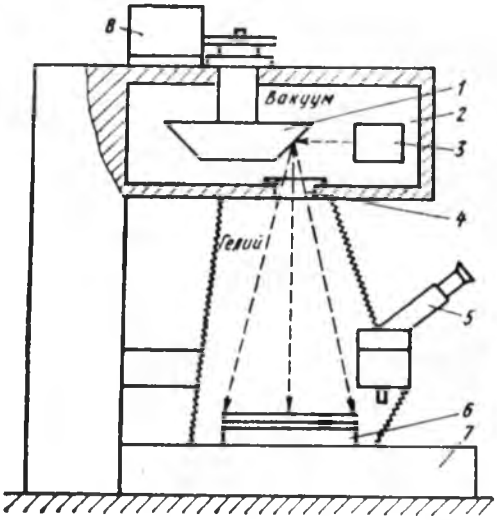


Рис. 122. Базовая система рентгенолитографии:

1 — вращающийся анод, охлаждаемый водой; *2* — вакуумная камера; *3* — электронная пушка; *4* — окно, закрытое фольгой; *5* — микроскоп; *6* — шаблон, резист и пластина; *7* — устройство совмещения; *8* — привод вращения анода

зист при экспозиции поглощал его, и достаточно жестким для того, чтобы его не поглощали фольга, закрывающая окно от источника излучения, или подложка фотошаблона. Обычно используют излучение с длиной волны $\lambda = 0{,}4 \div 1{,}0$ нм.

Источник излучения смонтирован в вакуумной камере *2*. Испускаемые им рентгеновские лучи проходят вначале через тонкое окно *4* (обычно через бериллиевую пластину толщиной 25 мкм), затем через атмосферу гелия и, наконец, через шаблон, экспонируя резист на пластине *6*. Для обработки пластин диаметром 76 мм обычно рекомендуется располагать источник рентгеновского излучения на расстоянии 200—500 мм от пластины, а расстояние между шаблоном и пластиной поддерживать в пределах 3—25 мкм для того, чтобы предохранить и шаблон, и пластину от повреждений.

Использование источников рентгеновского излучения порождает ряд проблем конструирования. Так как длина волны излучения лежит в вышеуказанных пределах — для коллимирования рентгеновских лучей не существует подходящих зеркал или линз. Это означает, что идеальный источник рентгеновского излучения должен быть точечным, а его расстояние до мишени — достаточно большим, чтобы пучок рентгеновских лучей можно было считать параллельным. Выполнить эти требования, к сожалению, полностью нельзя, поэтому приходится рассматривать ряд компромиссов между расстоянием и расхождением пучка с учетом того, что интенсивность облучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения. Кроме того, рентгеновский источник не является истинно точечным. Конечность размеров источника и расхождение пучка приводят к появлению двух типов искажений: возникновению полутеней и геометрических искажений.

Искажения, связанные с полутенями, могут быть пояснены с помощью рис. 123. Так, в результате зазора между пластиной и шаблоном, поглощающим рентгеновские лучи, граница поглощения рентгеновских лучей становится размытой ввиду того, что

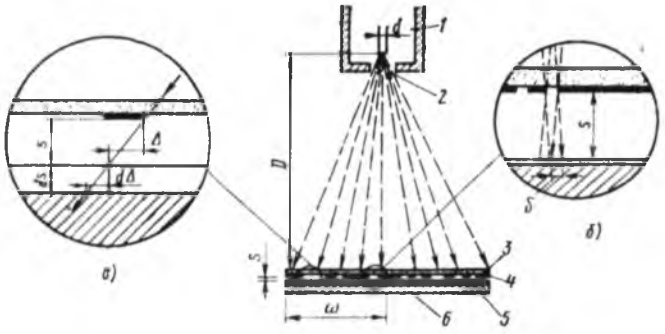


Рис. 123. Искажения топологии шаблона при рентгенолитографии:
а — за счет геометрических искажений; *б* — за счет образования полутеней; *1* — источник излучения; *2* — окно с бериллиевой фольгой; *3* — рентгеношаблон; *4* — слой, поглощающий излучение; *5* — рентгенорезист; *6* — подложка

источник рентгеновского излучения имеет конечные размеры. При этом справедливо следующее соотношение:

$$\delta = S(d/D),$$

где δ — минимальная достижимая линейная разрешающая способность; d — диаметр источника излучения; D — расстояние между шаблоном и источником.

В результате этих искажений стенки экспонированных областей фоторезиста не будут вертикальными, а размеры, получающиеся при последующей обработке, будут неопределенными. В большинстве рентгенолитографических систем эта нечеткость края линии лежит в пределах 0,1 мкм При размерах источника рентгеновского излучения, равных 5 мм, и расстоянии от источника до пластины 200 мм такая величина размытия может возникнуть при расстоянии между шаблоном и пластиной не менее 4 мкм.

Геометрические искажения при использовании рентгенолитографии возникают в результате того, что применяется проекционная система: изображение не лежит непосредственно на пластине, а представляет собой проекцию шаблона на пластину, получаемую с помощью источника рентгеновского излучения. Степень этих искажений Δ зависит от положения изображения на пластине:

$$\Delta = S(\omega/D),$$

где D — расстояние от источника до пластины; ω — расстояние от данной точки пластины до перпендикулярной проекции источника рентгеновских лучей на пластину (рис. 123, *а*).

Эти искажения выглядят как ошибка изображения по сравнению с шаблоном. При производстве схем с использованием наложения одного слоя изображений на следующие геометрические искажения могут создавать серьезные трудности. Эти проблемы

практически отсутствуют при изготовлении схем с топологическим рисунком, требующим высокой разрешающей способности, но при одном экспонируемом слое.

Необходимо отметить, что проблемы связаны не с самими искажениями, а с изменением искажения при переходе от одного слоя изображений к следующему. Это изменение возникает из-за того, что невозможно сохранить постоянный зазор между пластиной и шаблоном. Если величина изменения зазора равна ds, то геометрические искажения

$$d\Delta = ds\,(\omega/D).$$

Для того чтобы обеспечить $d\Delta \leqslant 0{,}1$ мкм на пластине диаметром 75 мм при $D = 200$ мм, необходимо поддерживать величину $ds \leqslant 0{,}5$ мкм. К тому же необходимо с большой точностью поддерживать плоскостность пластины в процессе выполнения различных высокотемпературных операций по ее обработке.

Электронно-лучевая литография открыла путь к освоению в производстве топологии микросхем с шириной линий субмикронного диапазона. В дальнейшем электронную литографию, кроме рентгенолитографии, может заменить ионно-лучевая технология. Она дает возможность получать структуры с размерами до 0,01 мкм благодаря меньшему по сравнению с электронами рассеянию ионов, отраженных от подложки в слое резиста.

Принцип построения ионно-лучевых систем, такой же как и электронно-лучевых, за исключением того, что для фокусировки и отклонения пучков рациональнее применять электростатические, а не электромагнитные поля. Конструкции систем и возможности ионной литографии окончательно не определены и находятся в стадии теоретической и экспериментальной проработки.

Вторую, не менее важную задачу, — разработку процессов и оборудования, обеспечивающих последующую обработку подложек с сохранением полученного субмикронного рисунка, решают применением так называемых «сухих» процессов травления слоев с использованием плазмы.

Широкое внедрение плазмохимических процессов в технологию производства микросхем определило рост требований к получению анизотропного травления с высокой степенью разрешения. Даже при толщине пленок 0,5 мкм получение высокой разрешающей способности возможно только при анизотропном травлении.

При плазмохимическом травлении для получения субмикронных размеров необходимо обеспечить прямоугольный профиль травления, т. е. анизотропный с нулевым подтравливанием при отношении толщины резиста к ширине линии более единицы и неравномерностью травления по пластине менее 5 %.

Для выполнения столь высоких требований необходимо оборудование для поштучной обработки, с кассетной загрузкой-выгрузкой пластин, при постоянном контроле процесса обработки.

ГЛАВА 13

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ТЕРМИЧЕСКИМ ИСПАРЕНИЕМ В ВАКУУМЕ

Требования к оборудованию для осаждения пленок в вакууме. С помощью методов осаждения пленок в вакууме изготавливают невыпрямляющие (омические) контакты в планерных приборах, внутрисхемные соединения в полупроводниковых интегральных микросхемах. К этим методам относятся термическое испарение и катодное распыление (диодная и триодная системы).

Отечественная промышленность выпускает сравнительно большое число вакуумных установок, предназначенных для термовакуумного испарения материалов. Установки отличаются друг от друга объемом рабочей камеры, предельно достижимым вакуумом, сложностью внутрикамерного устройства и оснащенностью аппаратурой для измерения режима испарения и параметров пленок в процессе нанесения.

К вакуумному оборудованию для осаждения пленок предъявляют следующие требования: высокая скорость откачки газов из рабочей камеры (это требование необходимо не только для сокращения рабочего цикла, но и для обеспечения быстрого и постоянного удаления остаточных газов, выделяющихся с внутренних частей установки и натекающих извне); минимальный обратный поток паров рабочих жидкостей из вакуумных насосов в камеру; разборность установки для удобства эксплуатации; высокая скорость испарения веществ и возможность регулирования ее в широких пределах за счет изменения подводимой к испарителю мощности; высокая производительность при групповой загрузке и обработке подложек; возможность одновременно с осаждением пленки получать требуемую конфигурацию тонкопленочных элементов пассивной части интегральных микросхем; возможность вести процесс как в высоком вакууме, так и в окислительной или восстановительной среде разреженного газа путем напуска его в откачиваемый объем.

Структурная схема установки для осаждения пленок в вакууме термическим испарением. Структурная схема установки для вакуумного осаждения тонких пленок приведена на рис. 124. Основными системами и устройствами, используемыми в установках и линиях для осаждения тонких пленок, являются:

вакуумная система: рабочая камера, насосы, фланцы, трубопроводы, уплотняющие элементы, затворы, вентили, натекатели,

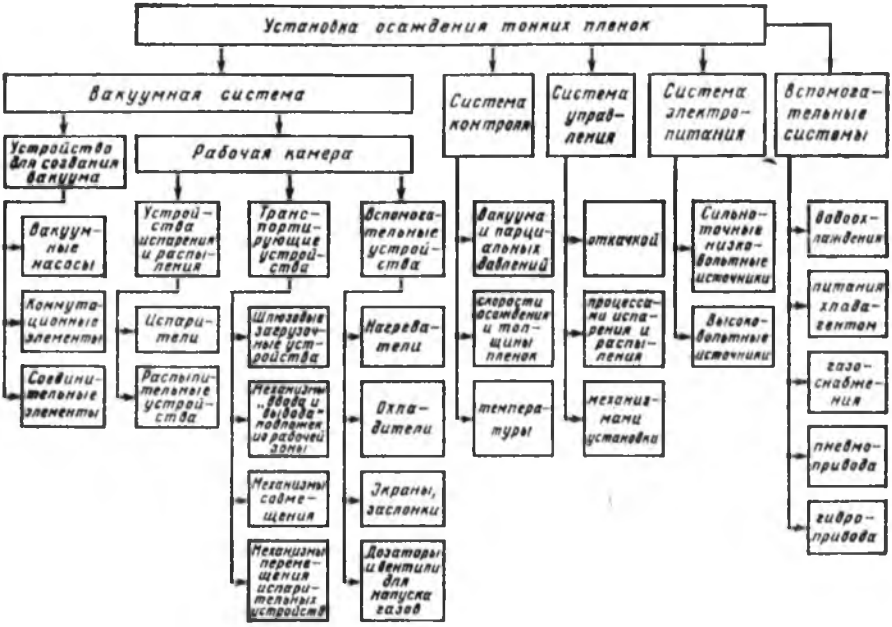


Рис. 124. Структурная схема установки для вакуумного осаждения тонких пленок

клапаны, ловушки, питатели хладоагентом, средства измерения вакуума и парциальных давлений остаточных газов и др.;

система контроля параметров технологического процесса и управления режимами работы установки: приборы для измерения скорости осаждения, толщины тонких пленок, температуры испарителей и подложек, аппаратура для контроля и автоматического управления процессом откачки и осаждения пленок и др.;

транспортирующие устройства, обеспечивающие шлюзовую загрузку и выгрузку подложек, ввод — вывод подложек из рабочей зоны, перемещение испарителей и т. д.;

устройства для испарения или распыления материала;

вспомогательные устройства (нагреватели, охладители, экраны, заслонки, дозаторы и др.);

система электропитания.

Рассмотрим в качестве примера базовую модель УВН-70А-1 для осаждения пленок в вакууме. Схема вакуумной системы установки УВН-70А-1 показана на рис. 125. Рабочая камера выполнена в виде цилиндра с горизонтальной осью и имеет торцевые крышки. Высоковакуумный затвор углового типа связывает рабочую камеру и паромасляный высоковакуумный насос типа Н-5К через азотную ловушку. В качестве форвакуумного средства откачки применен насос ВНМ-18Г. Коммутационная аппаратура имеет пневматический привод и управляется от электромагнит-

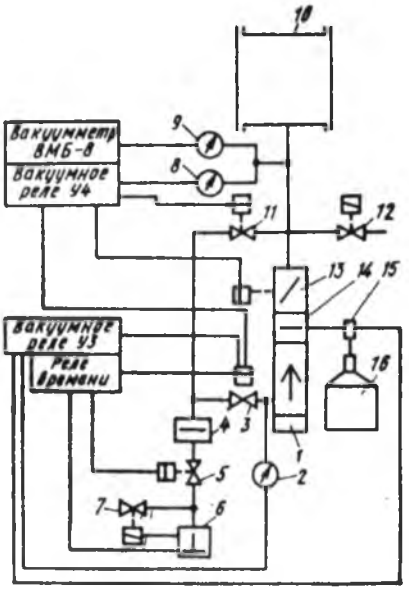


Рис. 125. Схема вакуумной системы УВН-70А-1:

1 — паромасляный насос Н-5К; *2, 8, 9* — манометры; *3, 5, 11* — клапаны; *4* — цеолитовая ловушка; *6* — форвакуумный насос; *7, 12* — натекатели; *10* — рабочая камера; *13* — высоковакуумный затвор; *14* — азотная ловушка; *15* — азотный питатель; *16* — сосуд Дьюара

ного золотникового устройства. Система охлаждения рабочей камеры имеет дополнительную магистраль для подачи горячей воды, что позволяет провести прогрев камеры перед разгерметизацией. Автоматическая система откачки выполнена на принципе измерения давления в контрольных точках.

Конструкционные материалы вакуумных установок. Предельный вакуум, т. е. минимальное давление, которое можно получить в откачиваемом объеме рабочей камеры, во многом определяется герметичностью рабочей камеры и свойствами материалов деталей и узлов вакуумной установки.

Материал для вакуумных установок должен иметь давление собственных паров, пренебрежимо малое по сравнению с предельным вакуумом; обеспечивать минимальное выделение газа; легко отдавать ранее поглощенные им газы и пары; быть газонепроницаемым; легко обрабатываться для получения чистой и гладкой поверхности; быть устойчивым к коррозии; быть химически инертным по отношению к маслам и промывочным средствам; обладать особыми свойствами, например хорошей теплопроводностью для испарителей и т. д.

Для изготовления вакуумных установок широко применяют прокатные материалы и ограниченно — литые. Последнее обусловлено большей газопроницаемостью литых материалов, а также способностью адсорбировать газы из-за значительной пористости и длительно отдавать их.

Из сталей для изготовления вакуумной аппаратуры наиболее широко применяют малоуглеродистую сталь 20 и коррозионностойкую немагнитную сталь Х18Н10Т. Сталь 20 отличается технологичностью при обработке, но обладает невысокой коррозионной устойчивостью, что определяет возможность ее применения при условии пассивирования поверхности до предельного вакуума порядка $1{,}3 \cdot 10^{-4}$—$1{,}3 \cdot 10^{-5}$ Па. Сталь Х18Н10Т применяют в установках, где требуется более глубокий вакуум.

Из цветных металлов для вакуумной аппаратуры широкое применение находит бескислородная медь марки М3. Она плас-

тична, газонепроницаема и имеет хорошую тепло- и электропроводность. Недостаток меди этой марки — низкая коррозионная стойкость по отношению к кислороду. Окисленные детали выделяют газ в вакууме.

Сплавы меди (латунь, оловянистые и оловянно-цинковые бронзы) применяют только для изготовления деталей, нагреваемых до температуры не свыше 150 °С. В противном случае давление собственных паров цинка и олова, входящих в сплав, становится сравнимым с достигаемым вакуумом.

Из остальных металлов и сплавов следует отметить бериллиевую бронзу, применяемую для изготовления пружинных контактов, никель для изготовления паяных узлов и ковар для выполнения вакуумных спаев со стеклом.

Широкое применение в качестве прокладочных и установочных деталей находят диэлектрики. Прокладочный материал в вакуумных установках применяют для обеспечения вакуум-плотности различного рода разъемных соединений. Помимо обеспечения герметичности разъемного соединения, прокладочный материал сам должен выделять минимальное количество газа.

В качестве прокладочных материалов среди диэлектриков получили распространение специальные сорта резины, фторопласт, эластомеры.

Вакуумная резина, обладая высокой эластичностью хорошо уплотняет разъемные соединения. Однако при длительном нагревании и температурах порядка 50—60 °С или кратковременном нагреве до 100—120 °С происходит разрушение резины с интенсивным выделением газа. Кроме того, при низких температурах резина теряет эластичность. Эти обстоятельства затрудняют применение резины в установках с предельным давлением ниже $1{,}3 \cdot 10^{-4}$ Па.

Фторопласт по сравнению с резиной менее эластичен, однако обладает большей термостабильностью. Он находит широкое применение в вакуумных установках в качестве прокладочного и электроизоляционного материала. Следует помнить, что при нагреве до 200÷300 °С выделение газа из фторопласта резко возрастает.

В настоящее время в качестве прокладочного материала широко применяют эластомер (витон). Этот материал допускает более высокий нагрев по сравнению с резиной (длительный до +200 °С и кратковременный до +250 °С). При этом он обладает меньшей интенсивностью выделения газа. Применение эластомеров вместо вакуумной резины позволяет на порядок увеличить предельный вакуум в установках.

Отечественным аналогом витона является резина на основе фторокаучука марок ИРП-2043 и ИРП-1345. Продуктами газовыделения резины этих марок являются пары воды, окись углерода и водород, а углеводороды присутствуют в малых количествах.

Для проверки эффективности применения уплотнителей из резины ИРП-1345 на серийной установке создали температуру стенок камеры ~150 °С. Ловушка, охлаждаемая жидким азотом, была заменена на адсорбционно-титановый насос. После трехсменной работы был получен предельный вакуум $5{,}3 \cdot 10^{-6}$ Па без применения жидкого азота.

Применение вакуумных уплотнений из термостойких отечественных эластомеров ТМ-2475, ИРП-1345 и ИРП-2043 и зарубежных, например ECD-006 и CORE-TEX, повышает температуру прогрева рабочей камеры вакуумной установки до 240—300 °С, что дает возможность значительно снизить время десорбции молекул газов и паров с поверхности камеры и внутрикамерного устройства.

При изготовлении сверхвысоковакуумных установок с давлением ниже $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ Па в качестве уплотнителей разъемных соединений используют металлические прокладки из мягкой меди или алюминия. Материал прокладки размещают между фланцами разъемного соединения. При стягивании он подвергается пластической деформации, обеспечивая надежное вакуум-плотное соединение. Такое соединение допускает длительный нагрев установки до температур порядка 500÷600 °С, что необходимо для обезгаживания установки при получении предельного вакуума.

Выделение газов из материалов, в частности, из металлов и сплавов, в большой степени зависит от их обработки до использования. Например, двойная вакуумная плавка стали снижает в несколько сот раз выделение газа из деталей, изготовленных из этой стали. Металлы и сплавы, протравленные с последующей промывкой органическими растворами, снижают выделение газа в несколько десятков раз.

При обработке металлов резанием не обеспечивается получение микрорельефа, свободного от трещин, раковин, царапин и других дефектов, что зависит от условий и режимов обработки, типа и состояния инструмента и обрабатываемых материалов.

Для повышения качества поверхности металлов используют шлифование, полирование и раскатывание. Например, процесс раскатывания способствует получению высокого качества поверхности (11—12 классы), образованию качественно нового микрорельефа поверхности обрабатываемого материала, уплотнению наружного слоя металла, работающего в вакууме, а также облегчению условий очистки и обезгаживания.

Оборудование периодического действия с групповой загрузкой подложек. Процесс осаждения тонких пленок испаряемого материала на подложки путем термического испарения в вакууме может быть разделен на три этапа: испарение вещества в вакууме, перенос паров вещества к подложке и их конденсация. Выбор испарителя зависит от свойств испаряемого вещества и его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, ее постоянства во времени и ряда других факторов. Для обеспечения высокой производительности и экономично-

сти процесса осаждения пленок от испарителя требуется создание такого распределения молекулярного потока испаряемого вещества, при котором достигалась бы максимальная равномерность толщины пленки на всей осаждаемой поверхности.

В зависимости от способа нагрева испарители можно подразделить на резистивные и электронно-лучевые. По конструктивным признакам резистивные испарители различают проволочные, ленточные и тигельные.

К материалам, используемым для изготовления нагревателей резистивных испарителей, предъявляют следующие требования:

давление пара материала нагревателя при температуре испарения осаждаемого вещества должно быть пренебрежимо малым;

материал нагревателя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым материалом, что необходимо для обеспечения хорошего теплового контакта между ними;

между материалами нагревателя и испаряемым веществом не должно возникать никаких химических реакций.

Электронно-лучевой испаритель, используемый в установках для осаждения тонких пленок, должен удовлетворять ряду специфических требований: малогабаритность, низкие рабочие напряжения, широкий диапазон удельных мощностей пучка, стабильность и воспроизводимость удельной мощности после замены катода и разборки испарителя. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяют электронно-лучевые испарители со щелевой формой электродов электронного прожектора и секторным магнитным отклонением ленточного пучка на углы от 90° до 180° с использованием трехэлектродной электронно-оптической системы.

Перенос потока испаряемых частиц в пространстве источник — подложка определяется длиной свободного пробега молекул. При давлении порядка 10^{-4} Па длина свободного пробега измеряется десятками метров, что во много раз превышает расстояние между испарителем и подложкой. Поэтому испарившиеся атомы перемещаются прямолинейной, без столкновений с молекулами остаточной газовой среды.

При соударении молекул напыляемого вещества с подложкой происходит их конденсация, определяемая температурой подложки. Нагрев подложки осуществляют с целью уменьшения количества загрязнений на ее поверхности и улучшения сцепления пленки с подложкой. Для нагрева подложек в установках термического испарения часто используют систему лучистого нагрева, содержащую излучатель (галоидные лампы накаливания) и рефлектор.

Вакуумная система установок для термического осаждения должна удовлетворять следующим требованиям:

предельный вакуум $1{,}3 \cdot 10^{-4}$—$6{,}6 \cdot 10^{-5}$ Па;

поддержание рабочего вакуума в процессе осаждения в пределах $2{,}6 \cdot 10^{-3}$—$6{,}5 \cdot 10^{-4}$ Па;

обеспечение воспроизводимости цикла в течение 30—40 мин;

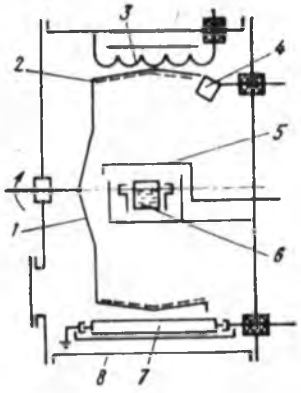


Рис. 126. Схема внутрикамерного устройства установки УВН-73П-1:

1 — барабан; *2* — подложки; *3* — нагреватель; *4* — измеритель скорости осаждения; *5* — заслонка; *6* — испаритель; *7* — ламповый нагреватель; *8* — рабочая камера

минимальное содержание паров масла в рабочем объеме;

удобство обслуживания и надежность в эксплуатации;

требуемые уровни парциальных давлений окисляющих агентов.

На основе базовой модели УВН-70А-2 создан целый ряд высокопроизводительного оборудования для получения пленочных структур интегральных микросхем. В качестве примера рассмотрим схему внутрикамерного устройства установки УВН-73П-1 (рис. 126). Эта установка предназначена для нанесения проводящих пленок (алюминия, ванадия и др.) способом термического испарения металлов в вакууме. На задней крышке камеры установлены три электронных испарителя с кольцевыми катодами, выполненными из вольфрамовой проволоки. Центральный испаритель предназначен для испарения ванадия, а два крайних — для алюминия. Подложки закрепляют на внутренней поверхности барабанного подложкодержателя. Конусообразная форма барабана с углом наклона 8° повышает равномерность толщины наносимых слоев по сравнению с цилиндрическим вариантом. Частоту вращения барабана устанавливают в диапазоне 1—30 об/мин и синхронизируют с помощью тахогенератора. Для измерения температуры осаждения на барабане закреплен термометр сопротивления, сигнал с которого через коллектор подается на измерительный прибор. Нагрев барабана и подложек осуществляют с помощью молибденового нагревателя и ламп накаливания.

Заслонка, управляемая электромагнитом, позволяет проводить предварительное обезгаживание испарителя и исходного материала без загрязнения подложек, а также прерывать поток испаряемого материала при достижении заданного номинала толщины или сопротивления пленки.

В настоящее время для создания требуемой топологии элементов на подложке широко применяют фотолитографические методы.

В установках для термического испарения периодического действия с групповой загрузкой исходных подложек одной из основных задач является нанесение пленок с требуемой равномерностью по толщине. Наибольшее влияние на равномерность пленки по толщине оказывают эмиссионные характеристики испарителей; наличие разного рода экранов и диафрагмы между испарителем и подложкой, взаимное расположение и перемещение ис-

парителя и подложек во время процесса осаждения, а также форма поверхности подложки.

При использовании неподвижного плоского или сферического подложкодержателя можно наносить равномерные пленки только на подложки малых размеров (при $h=200$ мм, $r=50$ мм). Для увеличения площади F необходимо увеличивать расстояние h, но при этом уменьшается скорость осаждения пленки.

Для увеличения площади одновременно обрабатываемых подложек и повышения равномерности распределения конденсата по толщине применяют планетарные или сателлитовые системы вращения барабанов.

Исходная подложка, первоначально имеющая плоский профиль, в процессе изготовления интегральной микросхемы обычно имеет большое число «ступенек» высотой от долей до нескольких микрон, а также различным образом ориентированных элементов, которые составляют с плоскостью подложки угол до 90°. При постоянном угле падения атомов или молекул конденсируемого пара на приемную поверхность подложки, имеющую сложный профиль поверхности, вследствие эффектов затенения распределение конденсата воспроизводит профиль ступенек.

Таким образом, наиболее приемлемым способом устранения неравномерностей при осаждении на ступеньку является использование внутрикамерных устройств с переменным углом падения атомов или молекул испаряемого вещества на поверхность подложки.

Подложки, находящиеся на поверхности плоского или сферического подложкодержателя, расположенного под углом к плоскости испарителя, будут одновременно совершать движение двух типов: вращение относительно оси симметрии подложкодержателя (что обеспечивает выравнивание распределения средней толщины конденсата по поверхности подложки за счет попеременного прохождения ею зон с малой и большой плотностью молекулярного потока) и орбитальное вращение относительно оси испарителя (что обеспечивает усреднение его эмиссионных характеристик).

Различные конструкции внутрикамерных устройств установок нанесения пленок в вакууме показаны на рис. 127. При этом виден последовательный переход от вращающихся подложкодержателей с плоской *(I, А, В* и *Д)* и сферической *(I, Б* и *Г)* формами и устройствами с планетарным движением *(II)* к подложкодержателям сферической формы *(III, Б, Д* и *IV, Б, В, Г)* для групповой обработки подложек и барабанам *(III, А, В* и *Г)* с расположением подложек на внутренней или внешней стороне.

Наряду с рассмотренными выше внутрикамерными устройствами установок периодического действия созданы установки полунепрерывного и непрерывного действия с магнетронной распылительной системой, содержащие шлюзовые камеры для загрузки и выгрузки плоских кассет с исходными подложками и рабочей камерой, успешно использующиеся в промышленности.

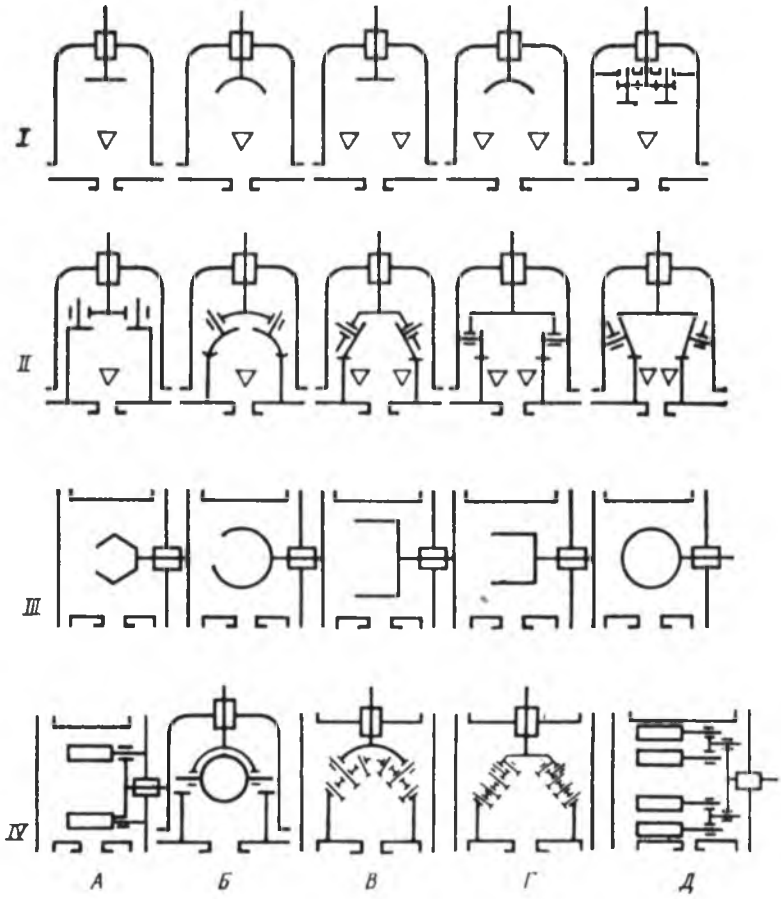


Рис. 127. Различные конструкции внутрикамерных устройств установок нанесения пленок в вакууме

2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Катодное распыление имеет следующие преимущества перед термическим: большая площадь поверхности распыления, что обеспечивает получение более равномерных по толщине покрытий; возможность распылять тугоплавкие металлы и сплавы без изменения состава; отсутствие разогретых деталей в вакуумной камере, лучшая адгезия пленок из-за высокой энергии ионов; возможность нанесения реактивных пленок; легкость очистки поверхности катода до начала катодного распыления зажиганием разряда при закрытой заслонке; возможность точной регулировки толщины пленки путем изменения величины напряжения на элек-

тродах, разрядного тока, времени процесса, а также давления инертного и реактивного газов; универсальность метода (могут быть распылены металлы с такими различными свойствами, как W и Au); возможность изготовления многослойных пленок одновременным распылением нескольких мишеней; безынерционность (распыление материала происходит лишь при наличии напряжения на мишени и сразу же прекращается после его снятия); применение мишеней с практически неограниченным запасом распыляемого материала позволяет широко использовать распыление ионной бомбардировкой в установках и линиях непрерывного действия; распыление ионной бомбардировкой может применяться не только для получения пленок и многослойных пленочных структур, но и для придания пленкам требуемой конфигурации и подгонки тонкопленочных резисторов в номинал с помощью ионного травления.

Принцип катодного распыления заключается в том, что на распыляемую мишень направляется поток ионов газа, ускоренных от нескольких сотен электронвольт до килоэлектронвольт, которые, бомбардируя ее, выбивают частицы вещества. Скорость осаждения, обеспечиваемая диодным методом, $5 \cdot 10^{-2}$ мкм/мин. Если разряд происходит в химически активной среде, то при бомбардировке мишени и распылении ее на подложке осаждаются сложные соединения. Такое распыление называют реактивным. По типу создания плазмы и распыления мишени ионные источники подразделяют на диодные и триодные.

Для объяснения механизма катодного распыления используют гипотезу, основанную на теории взаимодействия упругих тел. Ион, обладающий импульсом, движется к поверхности и внедряется в нее на определенную глубину. На пути движения ион смещает с положения равновесия атомы приповерхностных слоев, которые передают импульсы в различных направлениях соседним атомам, в том числе и в направлении, противоположном направлению иона. Часть атомов поверхностного слоя получают импульсы определенной энергии. При этом они могут вырваться с поверхности (распылиться) а затем осесть на подложке.

Оборудование для катодного распыления периодического действия. Схема диодного источника распыления показана на рис. 128. Диодная система состоит из катода-мишени *1* и анода *2*, на котором размещают подложку *3*. Катод-мишень является источником как распыляемого материала, так и электронов, поддерживающих разряд. Поток электронов образуется за счет вторичной электронной эмиссии. Для локализации разряда применяют экран *4*, располагая его на расстоянии 3—5 мм от катода. В рабочей камере с электродами создаются вакуум $1 \cdot 10^{-3}$—$1 \cdot 10^{-4}$ Па, после чего ее заполняют инертным газом до давления 1,3—13 Па. При подаче высокого напряжения (1,5 кВ) на электроды возникает тлеющий разряд. Если распыляемая мишень металлическая, то распыление ведется на постоянном токе; если же мишень — диэлектрик, то распыление ведется на пере-

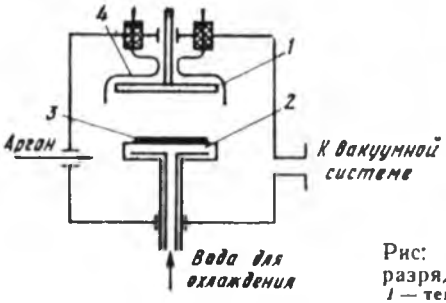


Рис. 128. Схема диодного источника распыления

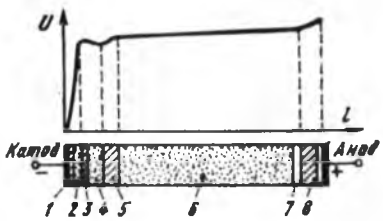


Рис: 129. Распределение потенциала в разрядной трубке:
1 — темное пространство; *2* — первое катодное свечение; *3* — темное катодное пространство; *4* — отрицательное тлеющее свечение; *5* — темное фарадеево пространство; *6* — положительный столб; *7* — анодное свечение; *8* — темное анодное пространство

менном токе. Причем мишень распыляется при отрицательной полярности, а при положительной — с нее снимается отрицательный заряд.

Положительные ионы инертного газа, образующиеся в тлеющем разряде, с большой энергией бомбардируют катод и способствуют распылению его вещества, которое затем конденсируется на поверхности подложки.

На рис. 129 изображено распределение потенциала в разрядной трубке.

Наибольшее падение напряжения при тлеющем разряде приходится на область *3* так называемого темного катодного пространства, которая и представляет наибольший интерес в отношении ионного распыления. В этой области ионы достигают максимальных скоростей, приобретая максимальные энергии для бомбардировки катода.

В качестве примера рассмотрим промышленную установку катодного распыления УВН-62П-1.

Установка предназначена для нанесения золота и других материалов на кремниевые, ситалловые и стеклянные подложки.

На рис. 130 приведена схема внутрикамерного устройства установки УВН-62П-1. Под вакуумным колпаком *10* находится транспортно-бункерное устройство, состоящее из загрузочного бункера *6*, механизма перемещения подложек *5*, механизма подъема подложек *8* и приемной кассеты *7*. Количество одновременно загружаемых подложек составляет 200 шт. Горизонтальные направляющие устройства заземлены и служат анодом. Под анодом на расстоянии 40—60 мм расположен водоохлаждаемый катод *2* размером 150×340 мм. На катод подается отрицательное напряжение до 5 кВ. Более высокое напряжение на катод подавать нецелесообразно, так как коэффициент распыления практически не изменяется вследствие того, что ионы с большей энергией глубже внедряются в катод и меньшая доля энергии пере-

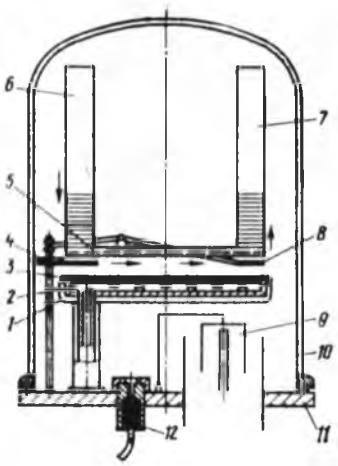


Рис. 130. Схема внутрикамерного устройства установки УВН-62П-1:

1 — экран; *2* — водоохлаждаемый катод; *3* — мишень; *4* — электрод смещения; *5* — механизм перемещения подложек; *6* — загрузочный бункер; *7* — приемная кассета; *8* — механизм подъема подложек; *9* — патрубок откачной системы; *10* — колпак; *11* — плита; *12* — натекатель

дается атомам поверхностных слоев. Поскольку анод заземлен, тлеющий разряд может возникнуть и между другими заземленными элементами рабочей камеры. Это может привести к их разогреву и повышенному газовыделению. Для локализации разряда в прикатодной области нижняя и боковые поверхности катода защищены экранами *1*, находящимися на расстоянии 3—5 мм от катода. Необходимо охлаждение катода, так как при его бомбардировке положительными ионами выделяется значительная тепловая энергия. Перегрев катода может привести к деформации катодного блока, частичному испарению материала катода, а также ухудшению равномерности осаждаемых пленок.

На базовой плите *11* смонтированы два натекателя *12* газа с электромагнитным управлением. Натекатели предназначены для создания заданной технологической атмосферы в рабочем объеме. Подложки из загрузочного бункера с помощью механизма перемещения по одной поступают на горизонтальные направляющие. Одновременно в зоне распыления может находиться пять подложкодержателей, причем механизм перемещения передвигает каждую подложку через все пять позиций. Интервал времени между подачами подложек устанавливается с помощью реле времени. Подложка, пройдя над катодом, подается в приемную кассету. Для обезгаживания и очистки исходных подложек в рабочую камеру вводят электрод смещения *4*, на который подают положительный потенциал до 300 В. Так как подложки имеют небольшое отрицательное смещение, то они подвергаются бомбардировке ионами инертного газа небольшой энергии.

Недостатки катодного распыления в сравнении с термическим испарением: 1) меньшая скорость нанесения покрытий; 2) более сложная электродная система и источники питания; 3) напуск чистых газов; 4) возможность загрязнения инертным газом напыляемого вещества; 5) подложка, на которой осаждается пленка, располагается на самом аноде, который бомбардируется ионами и разогревается, что усложняет регулирование температуры.

Магнетронные источники распыления. Разновидностью диодной системы распыления являются магнетронные источники для распыления металлов, полупроводников и диэлектриков. Разряд в них возникает в скрещенных электромагнитных полях, в резуль-

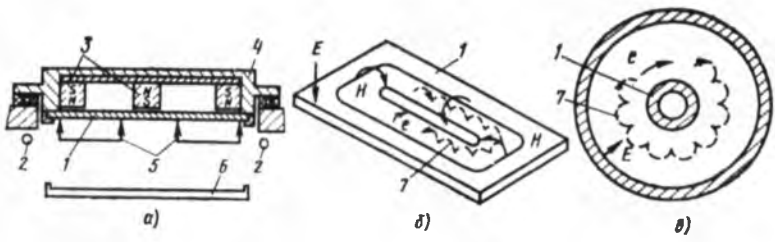


Рис. 131. Магнетронные источники распыления:
а, б — с плоским катодом; *в* — с цилиндрическим катодом

тате чего достигаются высокие скорости осаждения металлов и сплавов (~2 мкм/мин) при расстоянии от мишени до подложки 60 мм.

На рис. 131, *а* и *б* изображены магнетронные источники с плоскими катодами. На электроны, эммитированные катодом *1* и движущиеся к аноду *2* под действием электрического поля, приложенного между катодом и анодом, действует магнитное поле, приложенное перпендикулярно электрическому. В скрещенных электрическом и магнитном полях путь движения электронов увеличивается, в результате чего при введении в источник рабочего газа достигается наиболее высокая концентрация ионов газа. При давлении газа порядка $1 \cdot 10^{-1}$ Па можно получить большие плотности ионного тока (0,2 А/см^2).

Ионы под действием электрического поля направляются к катоду, бомбардируют его, распыляя с большой интенсивностью.

Область распыления *5* определяется областью интенсивной фокусировки плазмы магнитным и электрическим полями. Распыляемое вещество осаждается на подложку *6*. Магнитная система *3* монтируется в водоохлаждаемом корпусе *4*. На рис. 131, *б* и *в* показаны траектории *7* электронов в электрическом *E* и магнитном *H* полях в случае плоского и полого цилиндрического катода. В случае распыления диэлектриков используют ВЧ-источники питания вместо источников постоянного тока.

Оборудование для катодного распыления непрерывного действия. В установке непрерывного действия (рис. 132) загрузку изделий осуществляют транспортирующим устройство (ротором), имеющим один паз для размещения изделия. Откачивают шлюзовое загрузочное устройство *1* форвакуумным насосом. Внутри установки имеются две распыляемые мишени *5* и конвейер *6*, которым транспортируют изделия.

Рабочая *4* и высоковакуумные шлюзовые камеры *2* и *7* разделены между собой перегородками с каналами для прохождения конвейера. Между камерами установки в шлюзовых устройствах применена открытая шлюзовая система. При работе установки осуществляют непрерывную высоковакуумную откачку шлюзовых камер нагрева *2* и охлаждения *7*. Для высоковакуумной откачки рабочей камеры *4* открывают затвор *8*.

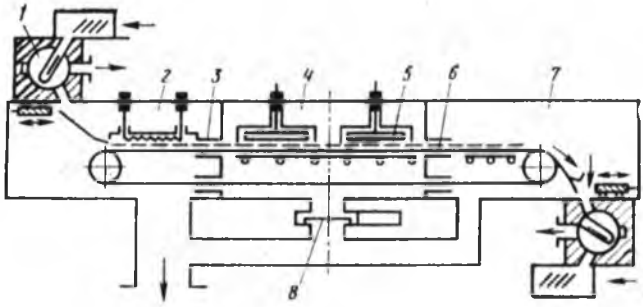


Рис. 132. Схема установки для катодного распыления непрерывного действия

Для нанесения пленок в рабочей камере *4*, закрывая затвор *8*, устанавливают давление 1,3 Па и откачивают рабочий поток газа через зазоры между конвейером *6* и каналами *3*. Таким образом в шлюзовых камерах *2* и *7* поддерживают более высокий вакуум, чем в рабочей *4*, что уменьшает загрязнение ее газовой среды. При изменении скорости конвейера и режима работы устройства нанесения покрытия изменяются толщина пленки и производительность установки.

В подобных установках со шлюзовыми загрузочными устройствами используют открытые и комбинированные шлюзовые системы. Шлюзовые устройства такого типа применяют для разделения между собой рабочих и шлюзовых камер, что позволяет поддерживать значительный перепад давлений между камерами и уменьшать взаимное влияние их газовых сред.

Шлюзовые загрузочные устройства компактны, конструктивно просты и позволяют сохранять качество рабочей поверхности изделий. Кроме того, в таких устройствах не применяют держатели. Увеличивая количество вакуумных камер в шлюзовых устройствах, создают большой перепад давлений между атмосферой и рабочей камерой. Чем меньше объем загрузочной полости в шлюзовом устройстве, тем меньше времени его откачивают и меньше вносят загрязнений в газовую среду рабочей камеры.

3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ

Схема установки для ионно-плазменного напыления показана на рис. 133. Термоэмиссионный катод *1* служит источником электронов. Рабочий газ непрерывно подается в рабочую камеру через натекатель и откачивается с помощью вакуумной системы. Ионно-плазменное напыление проводят при давлении 10^{-1}—10^{-2} Па, что обеспечивает более чистые условия осаждения пленок по сравнению с диодной системой (рабочее давление 1 Па). Это улучшение условий осаждения объясняется увеличением концентрации электронов при наличии термокатода, приводящее к увеличению концентрации ионизированных атомов рабочего газа.

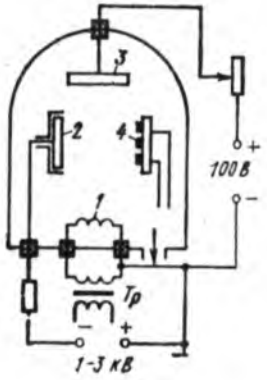


Рис. 133. Схема установки ионно-плазменного напыления

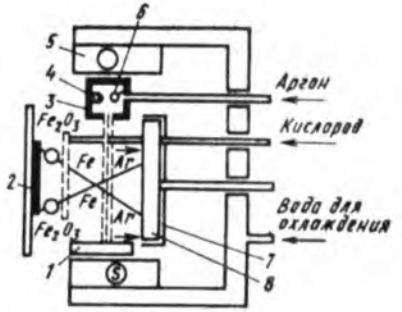


Рис. 134. Схема ионного источника триодного типа с эжектором плазмы

Электроны, двигаясь к аноду *3*, ионизируют молекулы остаточного газа. Разрядный ток при этом может быть равен нескольким амперам. Напряжение между катодом и анодом прикладывается порядка 100 В. Возникает низковольтный дуговой разряд между катодом и анодом.

Медленные ионы, образующиеся в разряде, очищают мишень и подложку от загрязнений перед началом распыления. Для этого на них подается небольшой отрицательный потенциал по отношению к потенциалу анода. Распыление начинается после того, как на мишень *2* подается высокое отрицательное напряжение порядка 1—3 кВ, вытягивающее ионы из плазмы дугового разряда между катодом и анодом. Распылившийся материал мишени попадает на подложку *4*, снабженную системой нагрева или охлаждения. Равномерность толщины пленки 1—2 %. Преимуществами ионно-плазменного распыления перед катодным является: большая стабильность газового разряда из-за применения термокатода; удобство очистки электродов ионным травлением ионами малых энергий; более высокая скорость распыления (0,3 мкм/мин); более низкое давление газа в процессе распыления, что позволяет легче обеспечить условия молекулярного потока при больших расстояниях между электродами; снижается рабочее напряжение и появляется возможность более точного управления температурой подложки. В обычных камерах триодного распыления мишень и подложки находятся в области ионизированного рабочего газа и подложка может нагреваться до нескольких сотен градусов, поэтому подложкодержатель делают водоохлаждаемым. Этот недостаток устраняется тем, что ионный источник делается щелевого типа, откуда плазма извлекается и направляется с помощью дополнительного электрода так, чтобы исключить помещение подложки в плазму. Такие ионные источники могут работать при давлении 10^{-3} Па.

На рис. 134 показана схема ионного источника триодного типа с эжектором плазмы. В разрядной камере *3* с помощью термокатода *6* из вольфрамовой проволоки и анода *4* возбуждается плазма рабочего газа, например Ar. Через щель в разрядной камере поток ионизированных газов извлекается с помощью разности потенциалов, прикладываемой между камерой *3* и коллектором *1*. С помощью магнитной системы *5* происходит фокусировка и локализация плазмы вблизи мишени *8*, распыление которой осуществляется подачей на нее напряжения 100—1000 В. Экран *7* закрывает тыльную и боковые части мишени. Осаждение распыляемого материала происходит на подложку *2*. На рис. 134 показана схема реактивного напыления пленок Fe_2O_3 на фотошаблон. Примерные рабочие характеристики приведенного ионного источника триодного типа:

Напряжение на аноде разрядной камеры, В	40—60
Напряжение магнитного поля, А/м	$24 \cdot 10^3$
Ток на аноде, А	20
Напряжение на мишени, кВ	3
Ток мишени, А	До 1
Рабочее давление напускаемого газа для распыления, Па	$(3—4) \cdot 10^{-2}$

В связи с большой рассеиваемой мощностью в разрядной камере и на мишени, электроды и камеры охлаждаются проточной водой. Для увеличения производительности перспективно использование установок непрерывного действия с наличием шлюзовых устройств, позволяющих вводить обрабатываемые изделия из атмосферы в зону обработки без нарушения вакуума. На рис. 135 приведена схема однопозиционной плазменной установки непрерывного действия для осаждения материала мишени *4* на подложки *7*, перемещающиеся на конвейере *8*. Подложки вводятся в вакуумную камеру непосредственно из атмосферы через входной шлюз *1*.

Недостатками ионно-плазменного распыления являются: более сложная конструкция электронной системы и источников питания; затруднения из-за наличия горячего катода в случае использования триодной системы для реактивного распыления, а также неравномерное распыление плоской мишени большого размера, так как концентрация ионов максимальна вдоль оси электронного потока.

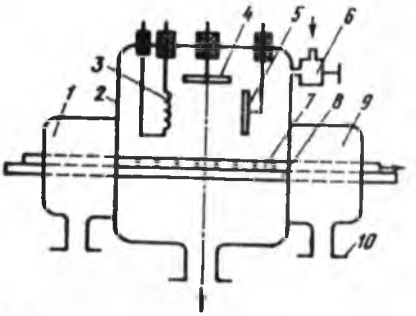


Рис. 135. Схема однопозиционной плазменной установки непрерывного действия:

1 — входной шлюз; *2* — камера установки ионно-плазменного напыления; *3* — катод; *4* — мишень; *5* — анод; *6* — натекатель; *7* — подложки; *8* — транспортер; *9* — выходной шлюз; *10* — патрубки для подключения к вакуумным системам

ГЛАВА 14

МОНТАЖНО-СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СБОРКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Технологический процесс сборки и монтажа включает весь комплекс операций, начиная с контроля параметров приборов на пластине зондовыми методами и кончая контролем герметичности корпусов. Основные виды оборудования, используемого для сборки и испытания интегральных микросхем, приведены на рис. 136.

К сборке микросхем в корпус предъявляют следующие основные требования: соединение должно обеспечивать омическую связь между определенными внутренними областями прибора и внешними выводами корпуса; корпус должен быть достаточно прочным и обеспечивать надежный теплообмен между внутренней и внешней средами и защищать действующий прибор от внешнего излучения, технологические процессы сборки должны обеспечивать возможность механизации.

Оборудование для сборки, сварки и пайки изделий микроэлектроники можно подразделять по следующим трем основным признакам: по назначению, методам соединения, степени механизации. По своему назначению оборудование подразделяют на следующие виды: для присоединения кристалла к корпусу, для выполнения соединений контактных площадок кристалла с выводами корпуса, для монтажа навесных элементов на печатные платы и в гибридных интегральных схемах, для герметизации приборов.

По методам соединения оборудование разделяют на виды в зависимости от способа сварки или пайки, реализованного в конкретной установке, например, установка для термокомпрессии или ультразвуковой сварки.

По степени механизации оборудование подразделяют на установки с ручным управлением, механизированные и автоматизированные. Существует несколько способов выполнения соединений между контактными площадками полупроводникового прибора или микросхемы и внешними выводами корпуса.

Последовательность операций при создании проволочных соединений между контактными площадками интегральных схем или транзисторов и выводами корпуса различными способами приведена в табл. 14. Для повышения производительности и качества сварки или пайки широко используют автоматизацию. Часто прибегают к автоматизации отдельных операций, например, подачи

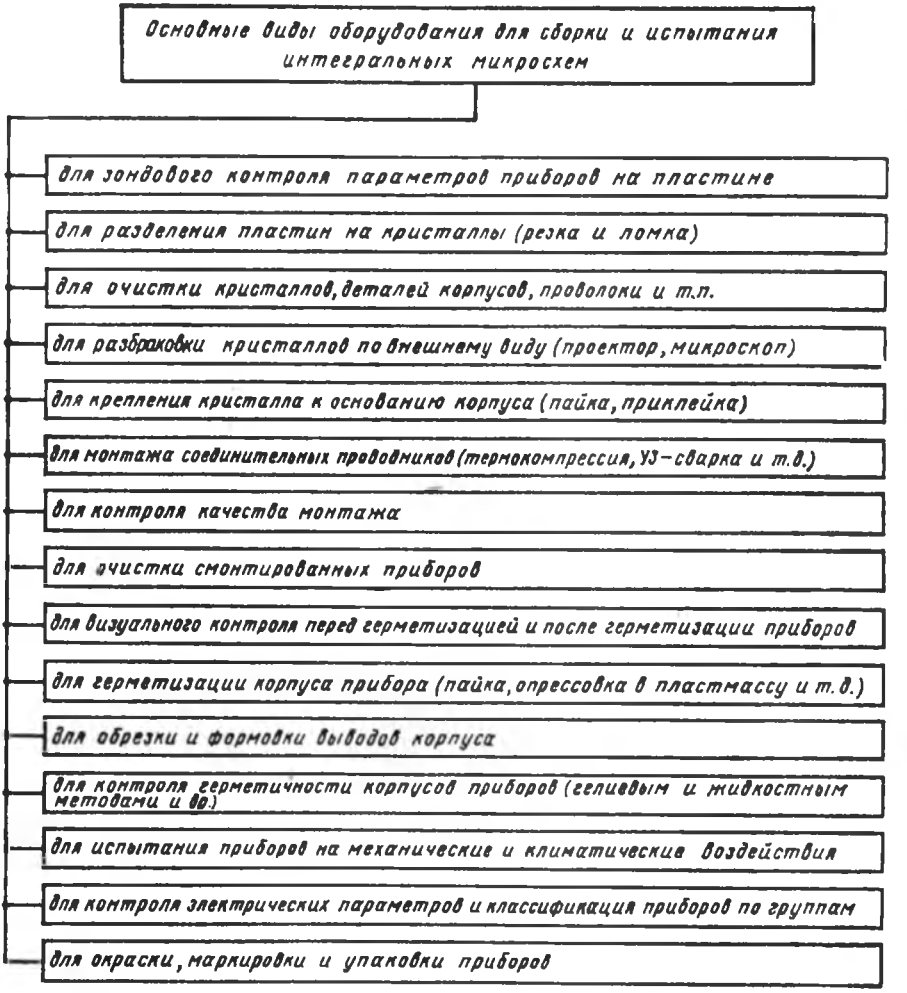
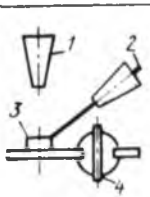
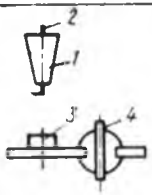
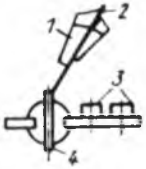
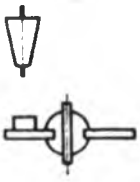
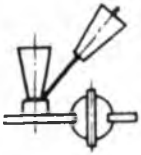
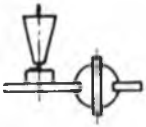
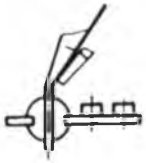
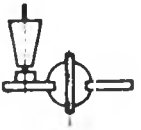
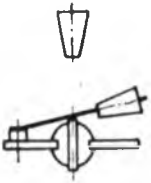
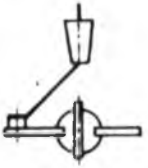
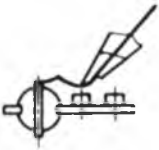
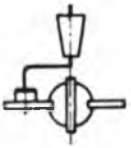
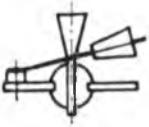
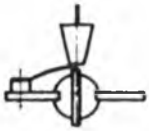
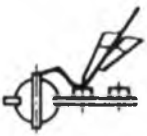
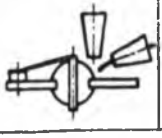
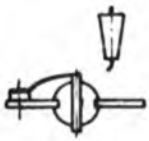
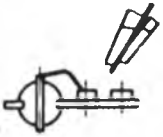
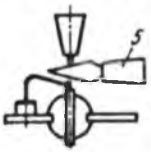


Рис. 136. Основные виды оборудования для сборки и испытания интегральных микросхем

и обрыва проволоки или подачи кристаллов из кассет. Наиболее сложно заменить ручной труд на операции совмещения контактных площадок с рабочим инструментом. Обычно используют устройства, облегчающие выполнение этой операции: совмещение по реперным знакам, центрирующие призмы для установки кристаллов на торце инструмента и т. п.

Кроме автоматизации механических устройств широкое применение нашли автоматизированные системы управления, стабилизации режимов. Они являются обязательным компонентом сов-

Таблица 14. Способы и последовательность операций при монтаже полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Название операции	Способ выполнения соединений			
	внахлестку с иглой с обрезкой проволоки кроем инструмента или ножницами	внахлестку капиллярным инструментом с обрывом проволоки (или с обрезкой ножницами)	внахлестку инструментом „птичий клюв" с обрывом проволоки	встык с образованием шарика и внахлестку капиллярным инструментом с обрезкой проволоки пламенем горелки
Совмещение проволоки 2 и инструмента 1 с контактной площадкой 3 (для „птичьего клюва" с выводом – траверсой корпуса)				
Сварка первой точки				
Совмещение проволоки инструмента с выводом корпуса 4				
Сварка второй точки				
Обрезка проволоки газовой горелкой 5 или инструментом				

ременных сборочных установок, так как обеспечивают высокую воспроизводимость режимов сварки или пайки, способствуют повышению качества соединений.

2. ТРЕБОВАНИЯ К МОНТАЖНО-СБОРОЧНОМУ ОБОРУДОВАНИЮ

Технологическое оборудование для монтажа изделий микроэлектроники должно отвечать требованиям полупроводникового производства и обеспечивать: работу с использованием осушенного воздуха или защитной атмосферы; отсутствие газовых и других выделений, которые могут вредно воздействовать на полупроводниковый прибор или микросхему; отсутствие недопустимых вибраций. Эти требования должны учитываться при конструировании, расчете и эксплуатации оборудования.

Способы сварки и пайки, которые используют в микроэлектронике, имеют существенные особенности, обусловленные спецификой микросоединений. Соединения в микросхемах, как правило, весьма миниатюрны: выводы имеют диаметр 25—100 мкм, а плоские детали — толщину 10—200 мкм, пленочные контактные площадки выполняют размером от 0,05×0,05 до 0,2×0,2 мм при толщине пленки 0,05—5,0 мкм. В качестве материалов выводов используются золото, алюминией, медь, позолоченный ковар или никель; контактные площадки на полупроводниках или диэлектриках изготовляются из алюминия, золота, меди, никеля, серебра; применяют печатные схемы с медной или никелевой фольгой. Для пайки используют разнообразные припои: оловянно-свинцовые, серебряные, эвтектические и пр.

Для обеспечения необходимого качества и надежности микросхем к способам и оборудованию для сварки предъявляют следующие требования: соединения должны быть достаточно прочными и надежными, с высокими электрофизическими свойствами; должны быть осуществимы соединения разнородных материалов; воздействие температуры и давления на микросхему при сварке или пайке не должно ухудшать ее параметры, а контроль качества соединения должен быть простым и надежным. Для удовлетворения этих требований разработаны следующие способы микросварки: давлением с подогревом (термокомпрессия); давлением с импульсным нагревом, ультразвуковая, контактная, лазерная.

При монтаже часто используют пайку импульсным нагревом, нагревом горячим газом с использованием припоев и сварку-пайку эвтектическими припоями.

Основными параметрами режимов точечной сварки и пайки импульсными нагревателями, определяющими ее качество, являются: сварочный (рабочий) ток, время протекания тока и усилие сжатия электродов. Однако качество сварного или паяного соединения определяется не только этими параметрами режима сварки, но и его размерами, структурой и свойствами материала

в зоне сварки или пайки, зависящими от условий его нагрева, охлаждения и степени пластической деформации. Поэтому режимы точечной сварки или пайки импульсными нагревателями подбирают на конкретном соединении опытным путем, используя в качестве исходных данных табличные параметры или номограммы. То же самое можно сказать и об ультразвуковой сварке.

Основными параметрами ультразвуковой сварки, влияющими на образование соединения, являются амплитуда колебаний и удельное давление на свариваемые детали. Длительность подачи ультразвуковых колебаний на сварочный инструмент мало влияет на качество сварки.

Каждый из применяемых способов сварки и пайки имеет ряд параметров, случайно меняющихся во времени, но существенно влияющих на качество соединения элементов приборов. В большинстве случаев они поддаются лишь приближенному расчету, поэтому окончательно режимы уточняются при проведении пробных процессов сварки или пайки.

3. ТИПОВЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ МОНТАЖНО-СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Для осуществления всего комплекса технологических операций установки для сборки интегральных микросхем, кроме рабочего инструмента, должны иметь: рабочий столик с нагревательной колонкой, механизм создания давления, механизм подачи и обрезки проволоки, манипуляторы для совмещения соединяемых элементов, механизм подачи кристаллов, корпусов, отрезков ленты, подложек и других соединяемых элементов, системы наблюдения (микроскопы, проекторы), системы питания и стабилизации режима, блоки управления.

Рабочий инструмент и блоки питания, как правило, специализированы. Их разрабатывают в соответствии с реализуемым в установке способом сварки или пайки.

Остальные узлы и механизмы более универсальны и могут применяться в различных установках. Выбор конструкции типового узла или аналога для использования в разрабатываемой установке определяется требованиями качества сборки, точности, производительности и удобства эксплуатации.

Необходимо отметить, что в последние годы и у нас в стране, и за рубежом появились полностью автоматизированные, адаптивные микросварочные роботы для внутрикорпусного монтажа приборов проволокой. Но и в них присутствует большинство из перечисленных выше основных узлов, используемых в полуавтоматических установках.

Рабочий столик с устройствами крепления элементов микросхем имеется во всех типах установок. В том случае, когда предусматривается общий разогрев соединяемых элементов, столик снабжается нагревательным устройством, чаще всего резистивного типа. Пределы регулирования температуры подогрева состав-

ляют 100÷500 °С. Для защиты от окисления в зону сварки или пайки подается защитный газ (осушенный азот или аргон).

Для получения качественных соединений весьма важно поддерживать (с точностью до ±5 °С) на нужном уровне температуру нагревателя (инструмента, рабочего столика) и одинаковую длительность процесса сварки. Это достигается использованием устройств для стабилизации температуры и реле времени.

Для нагревательных колонок может быть применена автоматическая схема двухступенчатого регулирования температуры. В схему включены датчик температуры, который устанавливают в зоне нагрева, и блок регулирования. Датчик включен в плечо измерительного моста. Выход измерительного моста соединен с регулирующим прибором, с помощью которого через управляющую схему осуществляются различные режимы нагрева.

Механизм давления также является обязательным узлом любых установок. В установках сварки давлением он играет основную роль, обеспечивая реализацию одного из трех важнейших параметров, гарантирующих высококачественную сварку. При этом применяют механизмы давления следующих типов: рычажно-грузовые, пружинные, электромагнитные, пневматические и гидравлические.

В установках УЗСКН используют рычажно-грузовой меха-

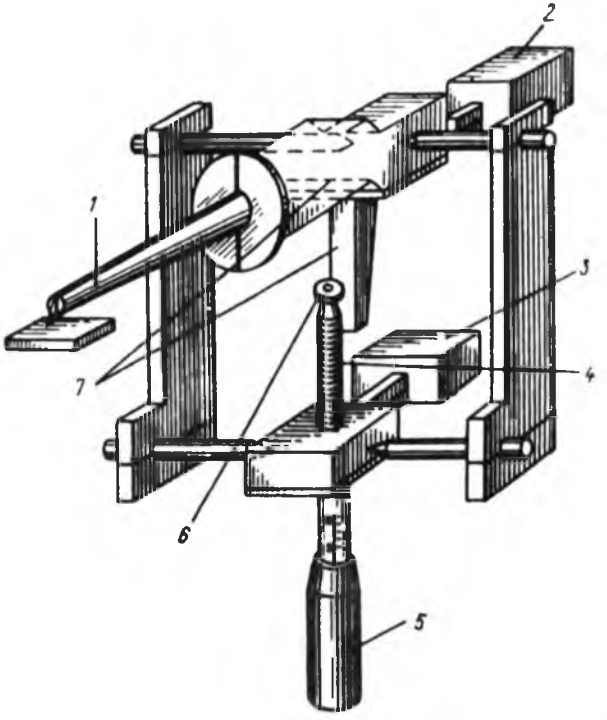


Рис. 137. Схема рычажно-грузового механизма сжатия установки УЗСКН-1

низм сжатия с переменными плечами, схема которого показана на рис. 137. Инструмент *1* прижимается к микросхеме усилием, которое создается грузом *3*. Усилие передается рычагами *7* и *4*, причем плечи рычагов можно изменять путем перемещения ролика *6*, винтом *5*. Изменение плеч рычагов *7* и *4* служит для регулировки усилия сжатия. Груз *2* нужен для уравновешивания рычага *7*.

Механизм давления пружинного типа (рис. 138) обеспечивает сжатие соединяемых элементов и плавную регулировку прижимающего усилия. Он состоит из трубчатого корпуса *2*, в который помещена коническая пружина *3*. Большим диаметром пружина опирается на чашку *4* штока *5*, предназначенного для регулировки нижнего предела усилия сжатия. Изменение усилия сжатия производится винтовым устройством *1*, имеющим равномерную шкалу и стрелочный указатель. Сухарь винтового устройства сжимает коническую пружину, величина усилия определяется в соответствии со степенью сжатия пружины по тарировочному графику.

При перемещении механизма давления штоком *5* вниз сварочный инструмент *7*, достигнув контактной площадки, останав-

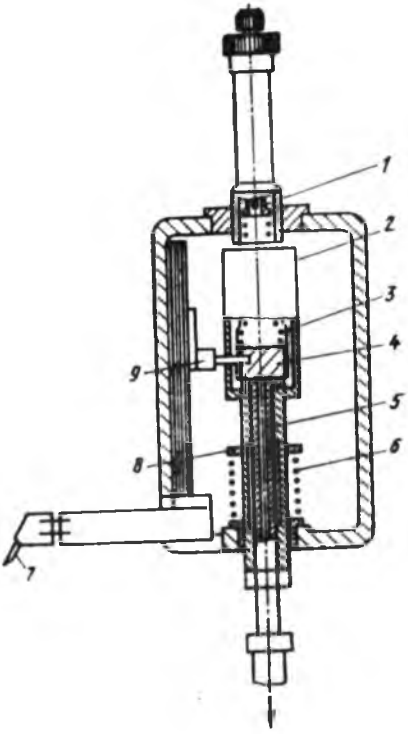


Рис. 138. Механизм давления пружинного типа

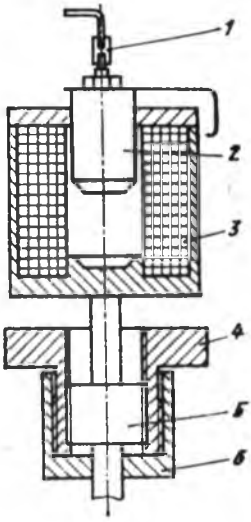


Рис. 139. Механизм давления с электромагнитным приводом

ливается. Шток отрывается от чашки и усилие конической пружины через поводок *9* передается на сварочный инструмент. Подвижная система сварочной головки возвращается в исходное положение цилиндрической пружиной *6*, усилие которой регулируется при помощи гайки *8*.

Механизм давления с электромагнитным приводом (рис. 139) состоит из корпуса *6* с гайкой *4*, в которой ходит ось-винт *5* с закрепленной на ней катушкой *3* электромагнита. В катушку помещен сердечник *2*, который через шарнир и кронштейн *1* соединен с держателем сварочного инструмента. Усилие сжатия регулируют изменением напряжения питания электромагнита.

Для точной подстройки положения электромагнита *3* внутренняя и наружная резьбы на гайке *4* сделаны с разным шагом так, что при повороте гайки на один оборот электромагнит перемещается всего лишь на величину разницы между величинами шагов резьб на деталях *6* и *5*.

Механизм подачи и обрезки проволоки используют, естественно, в установках монтажа проволочных выводов. Наиболее распространены следующие типы механизмов: механизм подачи и обрыва проволоки роликами, приводимыми в действие электродвигателем, осуществляющим также и подмотку проволоки на катушку;

механизм подачи и обрыва проволоки с помощью электромагнитов и специальной рычажной системы.

На рис. 140 показан механизм подачи и обрыва проволоки с помощью электромагнитов. Он состоит из основания *8*, зажимов *4* и трех электромагнитов. Проволока наматывается на катушку *7*, установленную на стакан *6*. При сматывании проволоки с катушки пружины притормаживают стакан, обеспечивая постоянное натяжение проволоки. Это необходимо для предотвращения образования петель. Зажимы *4* удерживают проволоку под дей-

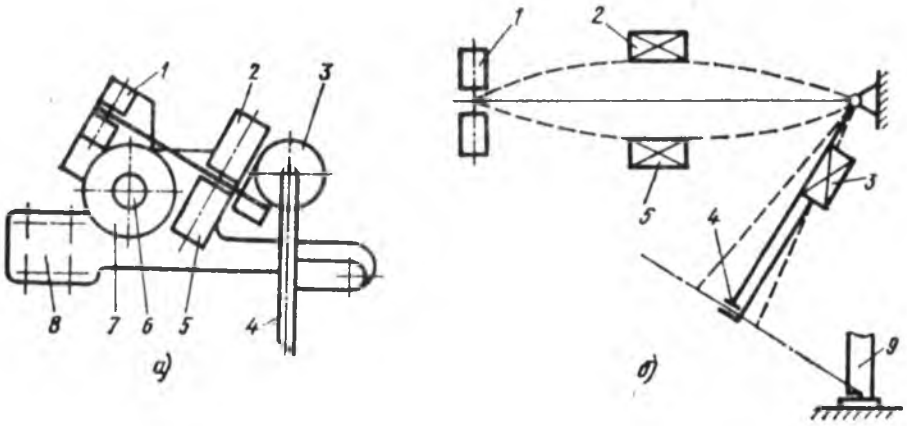


Рис. 140. Механизм подачи и обрыва проволоки:
а — устройство; *б* — кинематическая схема

ствием пружины, их размыкание производится электромагнитом *3*, усилие сжатия регулируется изменением натяжения пружины. Обрыв проволоки осуществляется электромагнитом *2*, а подача в инструмент *9* — электромагнитом *5*. Упоры *1* служат для регулировки подачи или обрыва проволоки.

Манипуляторы предназначены для точного совмещения соединяемых элементов и инструмента. При этом используют манипуляторы грубого и точного перемещения с передаточными отношениями от 5 : 1 до 200 : 1. Для установок с ручным и полуавтоматическим управлением применяют манипуляторы винтового, рычажного или пантографного типа.

Для автоматических установок с машинным зрением применяют координатные столы с приводом от обычных или шаговых двигателей.

Манипулятор рычажного типа показан на рис. 141. На плите *8* размещают шариковые направляющие *9*, по которым передвигается каретка *7*. На этой каретке устанавливают вторую пару направляющих *6*, по которым ходит несущая каретка *5*. Последняя шарнирно связана с ручкой манипулятора *1* кронштейном *4*. Изменению положения ручки манипулятора соответствует перемещение каретки в определенном масштабе, который зависит от соотношения плеч l_1 и l_2. Фланец *2*, установленный на ручке *1*, прижимается к опорному кольцу *3* пружиной. Усилие прижатия регулируют гайками так, чтобы обеспечить торможение манипулятора в любом положении.

В автоматизированных установках манипуляторы в сочетании со средствами наблюдения образуют системы ориентации.

Механизмы подачи кристаллов и корпусов имеют в своем составе кассеты различных типов, шаговые или координатные устройства перемещения и подающие приспособления, например вакуумные захваты.

Кассеты по расположению в них соединяемых элементов делят на кольцевые, линейные, вертикальные, двухкоординатные.

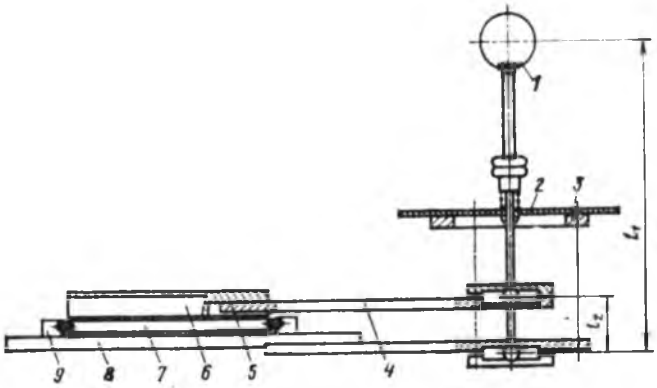


Рис. 141. Манипулятор рычажного типа

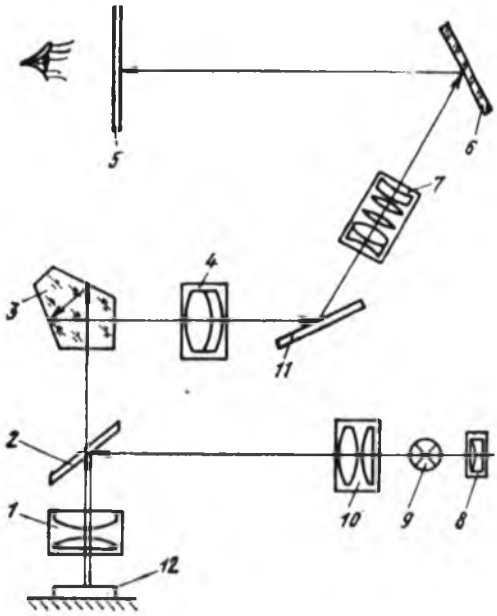


Рис. 142. Оптическая схема проектора для наблюдения за операциями сборки

В качестве носителей кристаллов или корпусов могут быть использованы металлические или пластиковые ленты. При виброподаче кристаллов и корпусов необходимо применять устройства подориентации деталей по углу поворота и положению «верх—низ».

Система наблюдения обычно представляет собой бинокулярный стереомикроскоп или проектор с увеличением от 8× до 80×. Для удобства работы система наблюдения должна иметь рабочее расстояние не менее 100—150 мм и большое поле зрения.

В некоторых автоматизированных установках системы наблюдения представляют собой сочетание проектора или микроскопа с промышленным телевизором. Использование микропроекторов и телевизионных систем наблюдения облегчает условия работы оператора и повышает производительность,

В установке сборки гибридных схем используют микропроектор с увеличением 25×, оптическая схема которого показана на рис. 142.

Осветительная система состоит из лампы накаливания *9* конденсора *10* и рефлектора *8*.

Микропроектор работает следующим образом: пучок лучей от источника света попадает на конденсор, который с помощью светоделительного зеркала *2* проецирует изображение источника света с увеличением 2 или 3 раза во входной зрачок объектива *1*. Пройдя объектив, пучок лучей освещает предмет *12* и, отразившись от него, снова попадает в объектив. Так как предмет расположен в фокальной плоскости объектива, то лучи, несущие изображение предмета, идут параллельным пучком. Они проходят светоделительное зеркало *2*, пентапризму *3* и попадают в объектив *4*, который дает проекцию изображения предмета, увеличенную в *2* раза. Это промежуточное изображение зеркалом *11* направляется в объектив *7* и с помощью зеркала *6* проецируется на экран *5*.

Рабочий инструмент является важнейшим элементом установок микросварки и микропайки. Существует несколько видов ин-

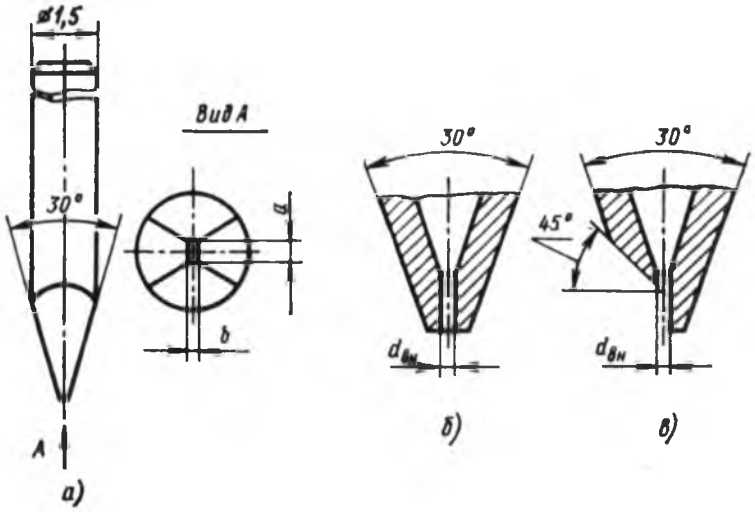


Рис. 143. Формы рабочих торцев инструмента для термокомпрессии:
а — клиновый с плоским рабочим торцем; *б* — для соединения внахлестку при любом направлении проволоки; *в* — для соединения внахлестку с малыми контактными площадками

струмента для термокомпрессии: клиновый инструмент с плоским (или профильным) рабочим торцом (рис. 143, *а*); инструмент с центральным капиллярным отверстием для соединения внахлестку при любом направлении проволоки (рис. 143, *б*) и для соединения внахлестку с малыми контактными площадками (рис. 143, *в*). Для ультразвуковой сварки применяют инструмент с боковым капиллярным отверстием для подачи проволоки.

Инструмент изготавливают из синтетического сапфира или рубина, твердых сплавов типа ВК-6, ВК-15.

Конструкция инструмента должна обеспечивать: получение сварочного соединения требуемой формы и размеров; наилучшую эффективность подвода тепла или передачи ультразвуковых колебаний в зону сварки; удобный подход к свариваемым деталям; простую и удобную подачу привариваемой проволоки под рабочий торец инструмента.

Материал инструмента для сварки должен удовлетворять следующим требованиям: обладать высокой износостойкостью при взаимодействии контактируемых поверхностей; обладать малыми акустическими или тепловыми потерями; иметь минимальную «схватываемость», а при контактной сварке должен иметь минимальное контактное сопротивление со свариваемыми материалами.

Геометрия рабочей части инструмента определяет не только конструктивную прочность сварного соединения круглого проводника с плоской поверхностью, но и влияет на условия развития сварки. При сварке и пайке импульсным нагревом от формы рабочего торца зависит передача тепла от инструмента в зону свар-

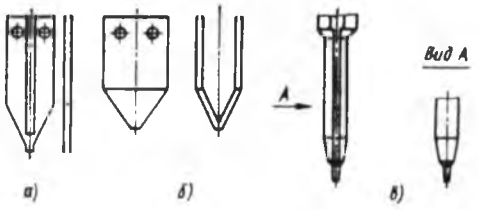


Рис. 144. Варианты конструктивного исполнения инструмента для сварки косвенным импульсным нагревом:
а — плоский; *б* — ленточный; *в* — стержневой

ки. При контактной сварке формой торцов определяется характер нагрева проводника за счет контактных сопротивлений. При ультразвуковой сварке форма торца определяет условия сцепления инструмента с проводником, а значит эффективность передачи ультразвуковых колебаний в зону контакта свариваемых элементов.

От геометрических размеров рабочей поверхности инструмента зависит его износостойкость, особенно при ультразвуковой сварке. С целью повышения износостойкости проводят химико-термическую обработку поверхности инструмента. Наиболее сильно инструмент влияет на стабильность и повторяемость параметров процесса при ультразвуковой сварке.

Проектирование инструмента для сварки импульсным косвенным нагревом необходимо проводить с учетом условий его нагрева и охлаждения. Конструкция инструмента должна обеспечивать выделение энергии при прохождении по нему импульса тока в наибольшей степени в рабочей части. Соотношение между полной энергией ($Q_э$), выделяющейся в инструменте (электроде), и энергией ($Q_р$) непосредственно выделяющейся в рабочей части, выражается через КПД инструмента ($\eta_и$), т. е.

$$Q_р = \eta_и Q_э.$$

При правильно сконструированном инструменте $\eta_и$ должен составлять не менее 16÷25 %. Варианты конструктивного исполнения инструмента для сварки косвенным импульсным нагревом показаны на рис. 144.

4. СПОСОБЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ В ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Все модели контроля качества сварных и паяных соединений можно разбить на два основных вида: испытания с разрушением соединений и испытания без разрушения как отдельных соединений, так и готовых микросхем.

К разрушающим методам контроля относятся: механические испытания соединений; микроскопические исследования на шлифах с применением обычных металлографических или электронных микроскопов; химический анализ (как обычный, так и с помощью электронного микрозонда).

К неразрушающим методам контроля можно отнести: визуальный осмотр соединений и готовых приборов; оценку качества соединений с помощью щупов; испытания на герметичность корпусов; просвечивание рентгеновскими лучами; определение характера распределения температуры работающего прибора с помощью инфракрасных микроскопов; измерение электрических характеристик готовых приборов.

Промежуточное положение занимают испытания приборов и микросхем на надежность: ударные, виброиспытания, климатические, испытания на термоудары и на старение, длительные электрические испытания на наработку до первого отказа и другие.

При анализе причин отказов какого-либо прибора сначала используют все возможные методы неразрушающих испытаний, а затем уже применяют разрушающие способы контроля.

Механические испытания и металлографический анализ соединений являются наиболее эффективными методами контроля и оценки качества соединений в различных приборах при отработке технологических режимов сварки или пайки.

Для оценки качества (прочности) сварных соединений тонких проводников с пленками на плоских подложках обычно проводят испытания на растяжение двумя способами: на отрыв с приложением нагрузки под углом 180, 90, 45 или 30° к поверхности подложки и испытание на срез с приложением нагрузки параллельно поверхности подложки.

В реальных конструкциях проводники по отношению к подложке могут иметь угол от 5—8° до 60—75°.

При испытаниях на растяжение оценка ведется по разрывному усилию, которое сопоставляется с прочностью на разрыв целого проводника.

Испытания соединений на отрыв проводят на специальном приборе, представляющем собой микровесы, коромысло которых имеет изменяемое плечо с грузом. Величину разрушающего усилия определяют по тарировочному графику, который специально составляют.

При разрушении соединения возможны три вида отрыва (рис. 145): по пленке, по утонению и по проволоке. В зависимости от характера отрыва производят корректировку режимов сварки, стремясь добиться характера разрушения, изображенного на рис. 145, *в*.

Металлографические исследования проводятся с целью определения структуры сварного или паяного соединения и влияния внутренних дефектов соединений. При этом выявляются: плохая

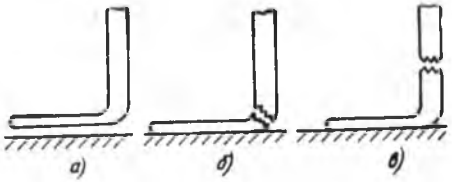


Рис. 145. Виды разрушения соединения проволочки с пленкой при испытаниях на отрыв:
а — по пленке; *б* — по утонению; *в* — по проволоке

адгезия напыленных пленок, пустоты в сварных и паяных соединениях, наличие интерметаллических структур, непровар (особенно при герметизации корпуса сваркой или пайкой), микротрещины в подложке в зоне сварки, степень растворения напыленной пленки при сварке или пайке, форма и размеры сварных соединений.

Методы контроля соединений и готовых приборов без разрушения в последнее время приобретают все большее значение при производстве микросхем. Визуальный осмотр является одним из наиболее доступных и распространенных методов. Его применяют для пооперационного или выходного контроля. Цель визуального контроля — оценка внешнего вида микросоединений по сравнению с эталонным образцом и выявление некачественных (дефектных). Обычно для микросоединений проводится 100 % визуальный контроль качества сварки по внешнему виду.

За критерий оценки качества сварных микросоединений при визуальном контроле принимают величину деформации проводника, которую определяют по формуле

$$\varepsilon = \left(1 - 0{,}8\,\frac{d_{\text{пр}}}{B_{\text{д}}}\right) 100,\ \%,$$

где $d_{\text{пр}}$ — диаметр проводника, мм; $B_{\text{д}}$ — ширина деформированной зоны проводника в месте сварки, мм.

Визуальный способ контроля качества соединений микросхем (особенно паяных) является достаточно надежным, быстрым и экономичным.

Для обнаружения дефектов в герметизированных интегральных схемах используют рентгеновский метод контрол. Обычно контроль производят рентгеновским излучением при напряжении до 150 кВ.

Метод испытания с помощью инфракрасных лучей позволяет выявлять зоны перегрева и максимальные температурные градиенты в готовых приборах. Этот метод контроля наиболее целесообразно применять в процессе разработки новых интегральных схем для предсказания возможных отказов без применения многих длительных и сложных электрических испытаний.

Испытания на герметичность готовых приборов являются одним из важных способов оценки качества герметизации корпусов и отбраковки потенциально ненадежных приборов и схем. Негерметичность определяют по величине течи. За единицу измерения в СССР принята такая течь, при которой в вакуумном объеме в 1 л давление возрастает на 0,13 Па за 1 с, т. е. на $0{,}13 \cdot 10^{-3}$ кгм^{2}с$^{-3}$, или $0{,}13 \cdot 10^{-3}$ Вт.

Методы контроля герметичности делятся на косвенные и прямые.

Косвенным методом оценку герметичности производят путем выдержки приборов в камере влаги или водяной бомбе и последующего измерения их электрических параметров. Чувствительность методов составляет $1 \cdot 10^{-6}$—$1 \cdot 10^{-8}$ Вт.

К прямым методам контроля герметичности можно отнести: широко распространенные испытания приборов в горячей масляной ванне или этиленгликоле, вакуумно-жидкостный метод и масс-спектрометрический метод (например, с помощью галиевого течеискателя).

При контроле герметичности в горячей масляной ванне прибор в герметизированном корпусе опускается в масло, а герметичность оценивают по выделению пузырьков нагревшегося газа. Чувствительность метода составляет $1 \cdot 10^{-6}$—$1 \cdot 10^{-8}$ Вт.

При вакуумно-жидкостном методе приборы помещают в жидкость, а над ней создают вакуум. Выделяющиеся под действием перепада давления пузырьки газа наблюдаются визуально. Чувствительность метода равна $1 \cdot 10^{-8}$—$1 \cdot 10^{-9}$ Вт.

При контроле герметичности гелиевым течеискателем приборы герметизируют в атмосфере гелия или опрессовывают в камере с гелием. Затем их помещают в вакуумную камеру, соединенную с течеискателем. Чувствительность метода составляет $1 \cdot 10^{-9}$—$1 \cdot 10^{-13}$ Вт.

5. ПУТИ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОНТАЖНО-СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Дальнейшего повышения производительности монтажно-сборочного оборудования можно достичь в результате:

автоматизации оборудования, созданного на основе существующих технологических процессов;

создания новых технологических процессов и оборудования на их основе;

разработки новых типов приборов и микросхем, позволяющих использовать принципиально новые методы сборки и монтажа.

Предельная производительность, которая может быть достигнута при сварке одиночных точек и ручном совмещении инструмента и контактной площадки, составляет около 3,6 тыс. сварок в час.

Значительного повышения производительности при сварке проводника (до 4,5—6 тыс. сварок в час) можно добиться при условии разработки оборудования с несколькими одновременно работающими инструментами и программным управлением процессом. Создание такого оборудования требует ужесточения допусков на размеры кристалла (до ± 15 мкм) и корпуса (до ± 30 мкм), унификации типоразмеров и расположения контактных площадок, а также создания оборудования для точной координатной посадки кристалла в корпус. Оборудование с программным управлением целесообразно создавать как специализированное для сборки микросхем и полупроводниковых приборов массового выпуска со стабильной программой.

Резкое повышение производительности и снижение стоимости сборки микросхем возможно на основе новых технологических

Рис. 146. Основные типы жестких выводов микросхем:

а — столбиковые; *б* — шариковые; *в* — балочные; *г* — рамочные: *1* — кристалл; *2* — вывод; *3* — корпус *4* — столбик; *5* — шарик; *6* — балка; *7* — рамка; *8* — промежуточная подложка

процессов с использованием жестких выводов микросхем и групповых методов монтажа, показанных на рис. 146:

приварка на подложку или посадка в корпус кристаллов с шариковыми, столбиковыми, или балочными выводами (рис. 146, *а — в*);

групповой монтаж плоских выводов (рамки) непосредственно на контактные площадки кристалла («паучковое» соединение, рис. 154, *а*).

сборка микросхем с применением промежуточной подложки, на которую монтируются «перевернутые» кристаллы при групповом методе сварки или пайки внешних плоских выводов корпуса (рис. 146, *г*).

Перспективными способами сборки для массового выпуска микросхем в пластмассовых корпусах являются «паучковое» соединение и сборка с промежуточной подложкой. Эти способы сборки позволяют повысить производительность в 5—10 раз.

Необходимость полной автоматизации микросварочных процессов при сборке полупроводниковых приборов и интегральных схем обусловлена:

значительным удельным весом отказов микросварочных соединений, основной причиной которых является ручной труд операторов, связанный с работой под микроскопом;

высокой трудоемкостью сборочных операций при изготовлении сложных приборов;

потребностью в решении социальной проблемы высвобождения операторов от работы с микроскопом.

Эти задачи и у нас в стране и за рубежом решаются путем создания полуавтоматических и автоматических машин. Полуавтоматические сборочные машины основаны на применении микроЭВМ в системе управления. Она выполняет функции управления по введенной в нее эталонной программе всеми исполнительными механизмами, включая автоматическую загрузку-выгрузку корпусов и автоматическое совмещение инструмента с контактными площадками приборов.

Однако машина остается машиной полуавтоматического типа потому, что она требует первоначальной установки по реперным знакам (подюстировки) каждого корпуса на позиции сварки.

После этого управляющая ЭВМ учитывает ошибку посадки кристалла в корпусе, корректирует эталонную программу и осуществляет процесс сварки.

Автоматические машины, называемые также «адаптивными роботами», по сравнению с предыдущими дополнительно включают в себя средства:

пространственной адаптации на основе системы «машинного зрения»;

технологической адаптации на основе системы активного контроля режимов сварки.

Система «машинного зрения» распознает образ кристалла и корпуса прибора, их реальное абсолютное и относительное положение и производит коррекцию координат эталонной программы сварки.

Система технологической адаптации обеспечивает реакцию системы управления на изменение технологических параметров. Такие автоматические машины обеспечивают повышение производительности на этой операции в несколько десятков раз.

ГЛАВА 15

АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОТОЧНЫЕ ЛИНИИ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

1. ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ МЕХАНИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Автоматизация производственных процессов — одна из основных тенденций развития современного производства, обеспечивающая повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции, а также улучшение условий труда.

Непрерывное расширение работ по автоматизации производства микросхем подчинено прежде всего внутренней логике развития электронной техники, изделия которой практически невозможно изготавливать без использования средств автоматизации. Другой очень важный аспект развития процесса автоматизации — это улучшение экономических показателей производства и, прежде всего, снижение общих трудовых затрат на единицу продукции, снижение себестоимости изделий, увеличение процента выхода годных приборов. Последнее в ряде случаев дает экономию основных и вспомогательных материалов, превышающую экономию от сокращения количества операторов в несколько раз.

При комплексной механизации и автоматизации, особенно структурообразующей стадии производства, необходимо учитывать специфику конструирования оборудования, вытекающую из особенностей полупроводникового производства, а именно:

1. Большое количество (130—150) самых разнообразных по характеру выполнения операций (диффузия, фотолитография, вакуумное нанесение пленок и т. д.) затрудняет или делает невозможным объединение ряда процессов и, следовательно, агрегатирование машин.

2. Для выполнения ряда технологических операций возникает необходимость создавать специально для этих узких целей некоторые виды специфического оборудования, например оборудования для сборки приборов в различные типы корпусов: металлостеклянные, керамические, пластмассовые и т. п.

3. С целью исключения субъективного влияния оператора на ход технологического процесса и обеспечения высокой точности поддержания технологических параметров режимов обработки необходима высокая степень автоматизации технологического оборудования. Без решения этой проблемы невозможно обеспечить идентичность приборов, выпускаемых миллионными тиражами.

4. Массовость выпуска изделий с учетом многономенклатурности и динамичности развития микроэлектроники требует высо-

кой мобильности как оборудования, так и компонуемых на его основе систем, т. е. способности оборудования быстро перенастраиваться с выпуска одного вида продукции на другой.

5. Необходимость соблюдения вакуумной гигиены требует герметизации или создания контролируемой газовой среды в зоне обработки при выполнении ряда технологических операций. А это влечет за собой необходимость создания шлюзов, транспортеров, накопителей длительного хранения, загрузочно-разгрузочных устройств, транспортной тары, предназначенных специально для обеспечения этих условий и сохранения их в процессе обработки.

6. При создании технологических линий возникает необходимость проектировать оборудование с различной производительностью с учетом переменного (по длине потока) и относительно невысокого процента выхода годных изделий. Это также затрудняет объединение машин в агрегаты и линии.

Все перечисленные выше особенности производства интегральных микросхем, которые необходимо учесть при конструировании оборудования, существенно усложняют и удорожают последнее и часто в результате в значительной степени снижается его надежность.

При проектировании оборудования микроэлектроники характерным является создание комплексов оборудования и технологических линий для проведения всего цикла технологических операций, начиная от заготовительных и кончая операциями герметизации, выходного контроля и упаковки готовой продукции, или, в отдельных случаях, для всех технологических операций участка. Это вызвано разнообразием используемых технологических процессов, требующих для своего осуществления соответствующего оборудования, различиями в размерах исходных заготовок пластин, в размерах и типах корпусов и, наконец, большой номенклатурой и числом контролируемых параметров приборов.

Комплекс оборудования представляет собой полный набор технологически необходимого основного и вспомогательного оборудования, обеспечивающего заданный выпуск годной продукции, территориально объединенного в цех, участки или группы с нерегламентированным их расположением.

Это характерно для непоточного производства.

При разработке комплексов оборудования учитывают последовательность выполнения технологических операций на участке, особенности их выполнения, требования вакуумной гигиены, возможность и пути исправления брака. Комплексные разработки позволяют создавать комплексы оборудования в едином стиле, удовлетворяющие всем требованиям промышленной эстетики. При этом используют методы узлового (модульного) конструирования, что значительно повышает эффективность, надежность и долговечность оборудования.

Завершенность разработки и поставки комплексов оборудования значительно сокращают сроки подготовки производства, мон-

тажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также сроки достижения их проектной мощности.

Современные комплексы оборудования могут насчитывать сотни установок более 50—60 наименований, отличающихся друг от друга методами обработки изделий, точностью, производительностью, уровнем механизации и автоматизации. Так, например, комплекс оборудования «Корунд», предназначенный для массового изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на подложках Ø 70 мм, охватывает все технологические процессы изготовления структур, сборки в пластмассовый корпус на отрезках ленты, контроля электрических параметров и испытаний приборов. Некоторые установки из числа входящих в комплекс рассмотрены нами ранее (см. рис. 63, 109, 110, 120, 130, 132). Оборудование комплекса оснащено высоконадежными прецизионными системами автоматического регулирования и программирования термическими камерами и реакторами с высокой равномерностью температурного поля и управления газовыми потоками.

Многие узлы, электрические блоки установок, а также пылезащитные камеры с ламинарным потоком обеспыленного воздуха унифицированы. В состав оборудования входит система централизованного управления комплексом с использованием ЭВМ, предусматривающая сбор и обработку статистической информации о работе комплекса с выводом данных на центральный пульт.

Весь комплекс разбит на участки: фотолитографии, диффузии, технохимии, вакуумного нанесения пленок, измерения параметров, сборки. На границах участков имеются накопители с автоматизированным учетом обрабатываемых партий пластин и длительности их межоперационного хранения в потоке обеспыленного осушенного азота (с ограничением или без ограничения времени хранения). Применение накопителей в комплексе позволяет повысить процент выхода годных изделий и увеличить коэффициент загрузки оборудования.

2. ВИДЫ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ

Следует иметь в виду, что массовость выпуска не всегда определяет метод производства. В приборостроении существуют три типа производства — единичный, серийный и массовый, а методов производства только два — непоточный и поточный.

Непоточным называют метод производства, при котором изделия обрабатывают партиями на каждой операции, обрабатывающее оборудование размещают группами (по типам) без определенной связи с последовательностью выполнения операций.

Поточным называют метод производства, при котором операции обработки или сборки закреплены за определенным оборудованием или рабочими местами, расположенными в порядке выполнения операций, а обрабатываемое изделие передается с од-

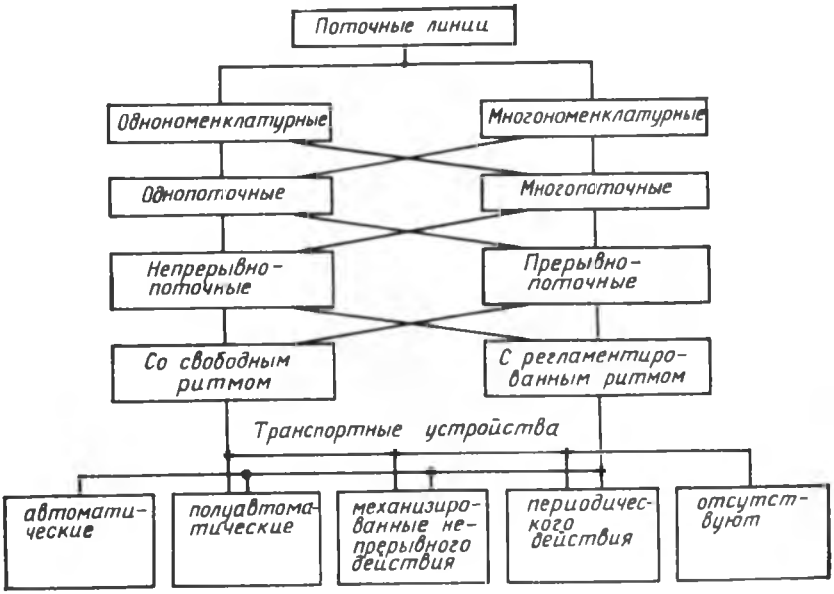


Рис. 147. Варианты конструктивно-технологических схем поточных линий

ной операции на другую сразу после выполнения предшествующей операции вручную или при помощи транспортных устройств.

Основой поточного производства является поточная линия. Поточная линия представляет собой группу обрабатывающих машин, каждая из которых специализирована на выполнении одной или нескольких однотипных операций, размещенных в порядке выполнения операции обработки или сборки и снабженных простейшим транспортным устройством для передачи деталей с одной позиции на другую. Рис. 147 дает представление о разнообразии конструктивно-технологических схем исполнения поточных линий.

По степени механизации и автоматизации технологических операций линии делят на механизированные, комплексно-механизированные, автоматические и полуавтоматические (автоматизированные).

Механизированная линия — это линия, в которой большая часть операций выполняется с помощью машин и других механических устройств, но некоторые основные и вспомогательные операции выполняют вручную вследствие невозможности или нецелесообразности их механизации; при этом процессы перемещения обрабатываемых изделий от одного рабочего места к другому механизированы.

Комплексно-механизированная линия — линия, в которой с помощью механизмов и машин осуществляются все без исключения основные, вспомогательные и обслуживающие

операции, входящие в состав части или всего технологического процесса изготовления изделия.

Автоматическая линия — система машин, расположенных в технологической последовательности, на которой все основные, вспомогательные и другие операции выполняются автоматически при помощи автоматов и автоматических устройств без применения ручного или механизированного труда, за исключением функций наладки, наблюдения и контроля.

Полуавтоматическая, или автоматизированная линия, — линия, в которой наряду с операциями, выполняемыми автоматически, частично совершаются и некоторые вспомогательные ручные операции. В зависимости от характера движения изделий по операциям производственного процесса (по степени непрерывности производственного процесса) следует различать непрерывно-поточные и прерывно-поточные линии.

Непрерывно-поточные линии — линии, на которых длительность всех операций производственного процесса равна или кратна ритму линии.

В непрерывно-поточных линиях работа всех машин синхронизирована во времени. Ритм непрерывно-поточных линий может быть принудительным (регламентированным) или свободным, поддерживаемым самим рабочим.

Прерывно-поточные линии — линии, на которых длительность операций (всех или части из них) не выравнена согласно ритму линии. Прерывно-поточные линии являются преобладающим типом поточных линий в производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Линии разделяют также по способу и характеру поддержания ритма работы:

с жестким (регламентированным) ритмом, который характерен для непрерывно-поточного производства; жесткость ритма поддерживается принудительным распределением изделий по рабочим местам с помощью транспортирующих устройств;

со свободным ритмом; линии не имеют технических средств, строго регламентирующих ритм работы. Эти линии применяют при любых формах потока, соблюдение ритма в этом случае возлагается непосредственно на работников, обслуживающих данную линию.

По номенклатуре закрепленных за линией изделий и порядку их чередования линии делятся на однопредметные и многопредметные.

Однопредметные однономенклатурные поточные линии, на которых изготавливают изделия одного наименования. Эти линии применяют в массовом производстве одноименной продукции, обеспечивающем достаточную специализацию и полную загрузку рабочих мест.

Многопредметные — многономенклатурные поточные линии — линии, на которых изготавливают по унифицированному технологическому процессу несколько наименований конструктивно схо-

жих изделий. Эти линии позволяют внедрять методы поточной работы в серийном производстве.

В зависимости от количества одновременно обрабатываемых объектов одного наименования линии делят на однопоточные и многопоточные. В полупроводниковом производстве применяют оба типа линий, так как для них характерно чередование операций с поштучной обработкой изделий на одних операциях, с обработкой изделий партиями на других операциях.

3. СТРУКТУРНАЯ И КОНСТРУКТИВНАЯ КОМПОНОВКА АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ

Накопленный приборостроительной промышленностью опыт проектирования линии и научные исследования позволяют сформулировать методы расчета и выбора тех или иных вариантов, их структурных и компоновочных решений. Любая система машин последовательного действия может быть скомпонована по различным структурным вариантам — от поточной линии до автоматической линии с жесткой межагрегатной связью.

Если каждая машина в линии имеет автоматический накопитель, то такую линию называют линией с гибкой межагрегатной связью. При отсутствии накопителей в автоматической линии и объединении машин общим транспортным устройством они должны работать в едином ритме. Такой структурный вариант называют линией с жесткой межагрегатной связью. Могут существовать и промежуточные варианты — автоматические линии, разделенные на участки, где число накопителей в линии меньше, чем число машин. На рис. 148 показаны возможные структурные варианты построения систем машин последовательного действия из 12 установок.

Деление линии на участки в полупроводниковом производстве производится по технологическому признаку, например, участок диффузии, участок химической обработки, участок вакуумного нанесения пленок, фотолитографии и т. д., при этом количество машин в участках неодинаково, следовательно, величина внецикловых потерь каждого участка различна. Между участками могут устанавливаться накопители для хранения обработанных полуфабрикатов.

Технологический процесс производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем можно прерывать лишь в строго регламентированных точках. Отклонение от этого требования неизбежно приводит к браку изделий. Поэтому в отличие от приборостроительной промышленности здесь практически не применимы методы деления линии на участки по принципу равновероятных или равновеликих потерь. Эти ограничения необходимо принимать во внимание при разработке структурной схемы линий производства полупроводниковых изделий. При этом устанавливают количество и состав необходимых элементов для реализации технологического процесса: основного и вспомогатель-

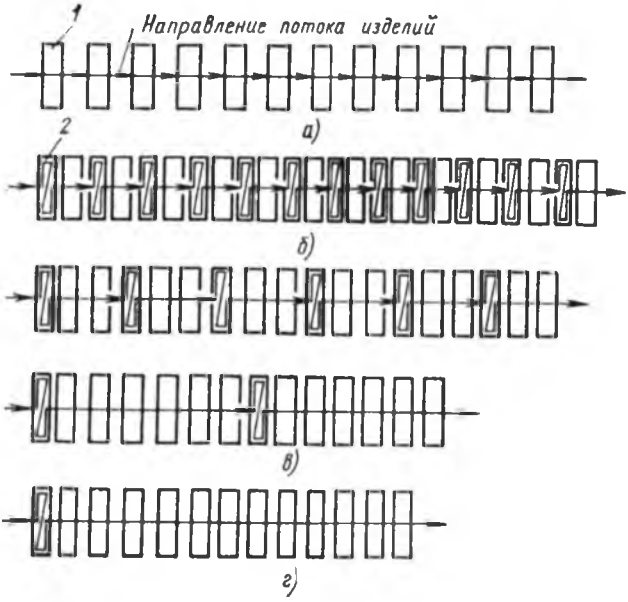


Рис. 148. Структурные варианты построения системы машин последовательного действия:

а — поточная линия; *б* — автоматическая линия с гибкой связью; *в* — автоматическая линия, разделенная на участки; *г* — автоматическая линия с жесткой связью

ного оборудования, накопителей, транспортных и пылезащитных устройств, систем управления линией и т. д.

Конструктивная компоновка автоматической линии решает проблему пространственного расположения и связи отдельных позиций и элементов, транспортных и других устройств линии.

Вследствие того, что выбор конструктивного варианта зависит от целого ряда факторов, задача определения компоновочного решения, как правило, является многовариантной. При одной и той же структурной схеме автоматической линии возможны различные компоновочные решения.

Пространственное расположение узлов линии также чрезвычайно разнообразно. Поэтому решение задачи обоснования и разработки конструктивной компоновки автоматической линии основывается, главным образом, на количественной оценке вариантов по стоимости, быстродействию и другим критериям экономической эффективности при сравнительном анализе различных вариантов.

4. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПОТОЧНЫЕ ЛИНИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Современные автоматизированные поточные линии представляют собой комплекс высокопроизводительного ав-

томатического и полуавтоматического оборудования, расположенного в порядке выполнения операций, связанного конвейерно-адресной системой и управляемого от электронно-вычислительной машины. Линии являются полуавтоматическими в связи с наличием в их составе полуавтоматических машин. Несмотря на это применение их в производстве позволяет: сократить численность обслуживающего персонала; сократить производственные площади благодаря применению высокопроизводительного оборудования и оптимальной организации производства; повысить уровень ритмичности; используя конвейерную систему и принудительное адресование пластин на обработку по мере освобождения оборудования, сократить длительность производственного цикла в 2,5—3 раза и за счет этого увеличить выход годных изделий.

В соответствии с общей структурно-технологической схемой производства интегральных микросхем (рис. 149) операции технологического процесса периодически повторяются, а изделия должны многократно проходить через одни и те же установки или участки. Так, например, изделия многократно проходят через участок химической обработки, обозначенный лучом *3* на схеме технологического процесса, т. е. операции *3, 19, 29, 45, 48, 68, 71* и *97*, и, соответственно, через участок контроля качества отмывки, обозначенный лучом *4*, с операциями *4, 20, 30, 46, 49, 69, 72* и т. д.

В этом случае удобно применять кольцевое расположение оборудования. Необходимость обеспечения межоперационного хранения изделий при значительной длительности обработки (до 5 смен и более) и следовательно, наличия накопителей длительного хранения позволяет кольцевую схему расположения оборудования представить в виде двух линий, расположенных одна против другой. Такое расположение оправдано тем, что сохраняется участковый принцип расположения оборудования, что удобно в отношении обслуживания и лучшего использования установок-дублеров.

Технологический процесс изготовления интегральных микросхем средней и большой степеней интеграции содержит до 10-ти операций диффузионной обработки, различающихся типами диффузантов, длительностью, температурами и т. д. В серийном многономенклатурном производстве, где в одновременном запуске находятся 150—200 типов микросхем, общее количество операций диффузии и окисления приближается к тысяче.

Очевидно, что одним из наиболее действенных факторов предупреждения массового брака является исключение субъективной роли персонала из управления процессом, т. е. полная автоматизация основных и вспомогательных операций, в том числе и учета движения пластин от запуска до получения окончательной продукции.

Положительным примером решения этих задач являются высокоавтоматизированные комплексы — поточные линии диффузии.

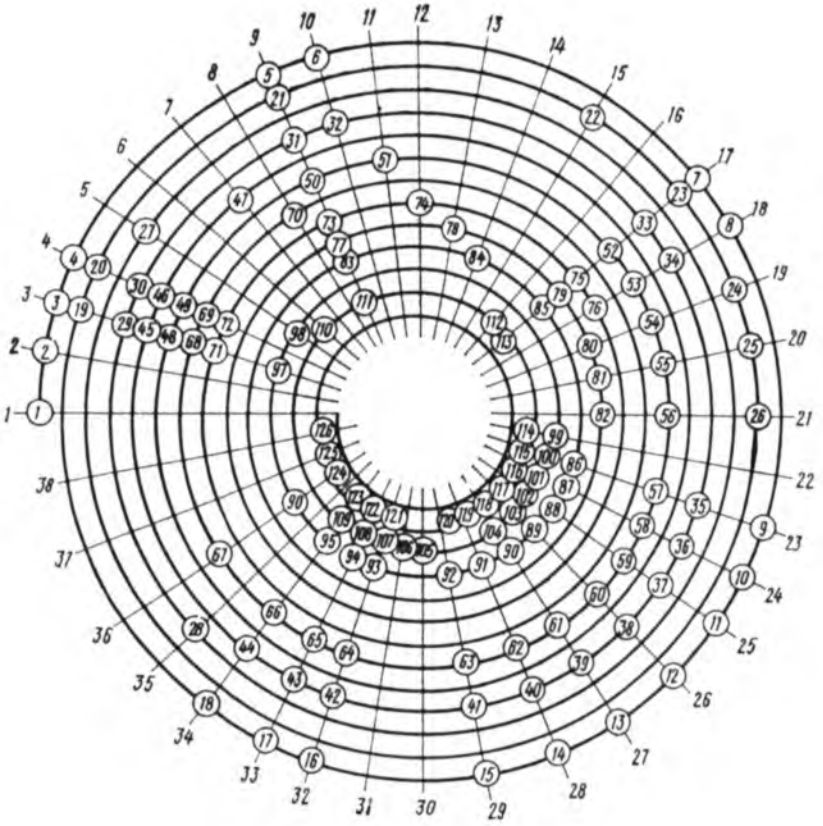


Рис. 149. Структурно-технологическая схема производства интегральных микросхем:

1 — формирование партии пластин; *2* — обезжиривание; *3* — химическая обработка; *4* — выборочный контроль качества очистки; *5* — снятие стекла и окисла; *6* — плазмохимическое напыление; *7* — имплантация ионов бора; *8* — имплантация ионов фосфора; *9* — переукладка пластин в кварцевую лодочку; *10* — окисление; *11* — отжиг базы; *12* — окисление низкотемпературное; *13* — отжиг эмиттера; *14* — отжиг стабилизирующий; *15* — разделительная диффузия; *16* — вплавление алюминия; *17* — переукладка пластин в кассету; *18* — определение толщины окисла; *19* — снятие окисла с пластины; *20* — измерение поверхностного сопротивления; *21* — измерение глубины диффузионного слоя; *22* — нанесение пленки алюминия; *23* — нанесение пленки фоторезиста и термокомпрессионная сушка; *24* — контроль выборочный; *25* — совмещение и экспонирование; *26* — проявление фотослоя; *27* — контроль качества проявления (выборочно); *28* — травление окисла; *29* — контроль качества травления (выборочно); *30* — травление металла; *31* — контроль травления металла (выборочно); *32* — снятие фоторезиста; *33* — контроль снятия фоторезиста; *34* — контроль после фотолитографии; *35* — контроль ВАХ; *36* — контроль по тестовым структурам; *37* — контроль статических параметров микросхем; *38* — упаковка пластин

В основе построения линий использован принцип объединения всех физико-термических процессов в единый технологический комплекс с автоматизацией всех вспомогательных операций, созданием пылезащитного коридора для движения изделий и повышенным коэффициентом использования технологического оборудования.

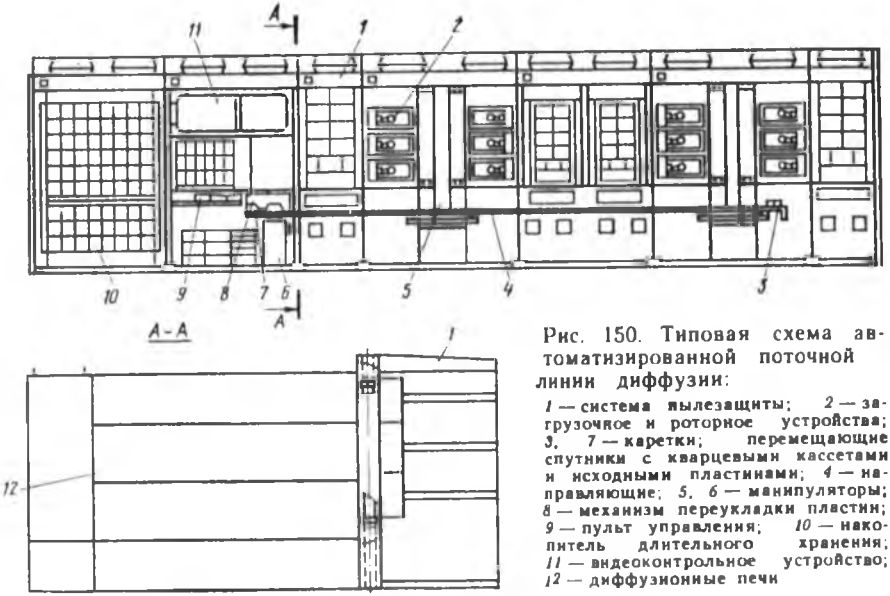


Рис. 150. Типовая схема автоматизированной поточной линии диффузии:

1 — система пылезащиты; *2* — загрузочное и роторное устройства; *3, 7* — каретки; перемещающие спутники с кварцевыми кассетами и исходными пластинами; *4* — направляющие; *5, 6* — манипуляторы; *8* — механизм переукладки пластин; *9* — пульт управления; *10* — накопитель длительного хранения; *11* — видеоконтрольное устройство; *12* — диффузионные печи

Типовая схема автоматизированной поточной линии диффузии показана на рис. 150.

Функционально линии состоят из следующих основных частей: термического оборудования (*12*); систем автоматической загрузки (*2, 5*); транспортной системы (*3, 4, 7*); системы автоматического адресования (*9*); системы пылезащиты (*1*); устройства групповой переукладки пластин (*6, 8*); накопителя партий пластин (*10*); системы управления (*9, 11*).

Конструктивно линии выполнены в виде «стенки», разделяющей зону обслуживания технологического оборудования с соответствующими коммуникациями от зоны «чистого коридора», формируемого модулями и блоками пылезащиты и предназначенного для транспортирования открытых пластин от оператора к реакторам диффузионных блоков и обратно.

На лицевой части стенки монтируют устройства автоматической загрузки изделий, блоки управления загрузкой с регуляторами скорости, манипуляторы, транспортную систему, пульты оперативной информации и управления физико-термическими процессами, центральный пульт управления с механизмами групповой переукладки пластин.

Линии комплектуют специальными носителями для транспортирования кварцевых кассет и кодовыми устройствами с индексами, определяющими принадлежность носителя с кассетой соответствующему реактору. Кварцевые кассеты, установленные на носители, могут попасть только на свою площадку роторного устройства соответствующего реактора.

Каждый реактор диффузионного блока имеет свой порядковый номер, состоящий из номера загрузочной системы (первая цифра) и номера самого реактора (вторая цифра), обслуживаемого данной загрузочной системой.

Манипулятор *5*, входящий в состав загрузочной системы, обеспечивает автоматическое считывание кода и перестановку партии пластин с транспортного устройства на любую из шести площадок приема соответствующих роторных устройств, а также осуществляет автоматическую или по команде оператора выдачу партий пластин на транспортное устройство *4*.

Доставка партий пластин к загрузочным системам и обратно осуществляется двумя транспортными самодвижущимися каретками *3*, *7* по специальной трассе.

Каретка *7*, расположенная у центрального пульта управления, обеспечивает транспортировку носителей с пластинами только к загрузочным системам, а каретка *3*, расположенная в противоположном конце трассы, — от загрузочных систем к центральному пульту *9*. Каждая из кареток работает при условии наличия одной из них в исходном положении.

Манипулятор *6*, входящий в состав центрального пульта, по команде оператора отрабатывает программу как приема носителя с транспортного устройства и установку его на стол оператора, так и обратное действие, а также используется для групповой переукладки пластин.

Партии пластин, поступающие на линию для обработки, устанавливаются в соответствующие ячейки накопителя *10*, очередность обработки которых определяется технологическим маршрутом. Каждая ячейка способна принимать до четырех транспортных кассет общей емкостью до 100 пластин (по 25 пластин каждая).

С центрального пульта управления по команде оператора вызывается кварцевая кассета, принадлежащая реактору, куда согласно технологическому маршруту необходимо доставить партию пластин. Сформированную партию пластин в транспортных кассетах из накопителя оператор устанавливает на механизм групповой переукладки пластин *8* и производит переукладку пластин из транспортных кассет в кварцевую. Емкость кварцевой кассеты 100 пластин.

По команде оператора партия пластин манипулятором *6* устанавливается на трассу и кареткой *7* транспортируется до заданной загрузочной системы, после чего каретка возвращается в исходное положение. Манипулятор загрузочной системы *5* отрабатывает программу приема, устанавливая партию пластин на приемную площадку роторного механизма, с которой после смены площадок производится загрузка кассеты в заданный реактор.

Роторное устройство (рис. 151) предназначено для автоматического переноса кварцевой кассеты из зоны, обслуживаемой манипулятором загрузочной системы, в зону, обслуживаемую автоматическим устройством загрузки.

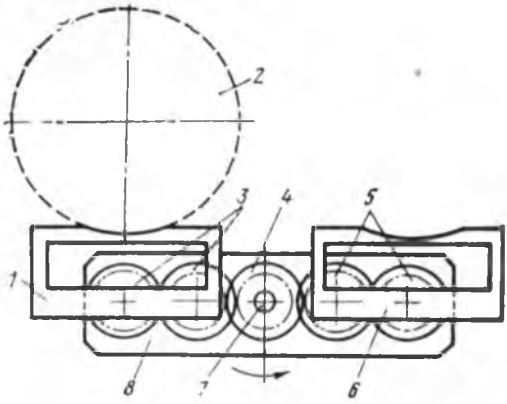


Рис. 151. Схема роторного устройства

Перегрузка, накопление и хранение кварцевых кассет с носителями осуществляется с помощью рабочих площадок *1* и *6*, которые в процессе работы меняют свое взаимное положение путем поворота планки *8* вокруг вала *7*. При повороте планки *8* на 180° для изменения взаимного расположения рабочих площадок плоскости, на которые установлены носители с кварцевыми кассетами, не изменяют своего горизонтального положения из-за обкатывания шестерен *5* и *3* вокруг неподвижной шестерни *4*. В изображенном на рис. 151 положении площадка *6* переместится в позицию, занимаемую площадкой *1*, под реактор диффузионной печи *2*.

По окончании технологического процесса обработки автоматически подается команда на выгрузку партий пластин из реактора. Открывается заслонка реактора и партия пластин выгружается на площадку роторного механизма. При наличии на второй площадке последующей партии пластин, поступившей на обработку, происходит смена положения площадок, после чего вновь поступившая партия может загружаться в реактор, а прошедшая обработку — охлаждается в течение заданного времени (0—60 мин). По окончании процесса охлаждения партия пластин оператором вызывается на центральный пульт управления, где при помощи механизма *8* (рис. 150) оператор производит переукладку пластин из кварцевой кассеты в транспортные и размещает их в накопителе длительного хранения *10*.

Контроль и управление работой линии осуществляется с центрального пульта управления *9*. Одной из основных его функций является адресование кассет с пластинами в соответствующие реакторы электропечей. Для обеспечения высокой чистоты процессов за каждым реактором закреплены только два определенных носителя кассет — загрузочный и приемный. Для распознавания каждый носитель имеет свой код, а считывающие устройства, установленные в центральном пульте, направляют носители с кассетами по трассе к соответствующим печам. Считывающие устройства, установленные в загрузочных системах, по кодам распознают «свои» носители с кассетами и переводят системы в положение приема кассет на загрузочные площадки соответствующих реакторов. При автоматическом направлении кассет в реакторы на центральном пульте зажигается табло с номером реактора.

Центральный пульт управления оснащен видеоконтрольным устройством *11*, которое сообщает оператору информацию о реакторах, в которых идут процессы, о времени — текущем и оставшемся до конца процесса, операциях (нагрев, охлаждение) и др. На другом табло пульта дается информация о работоспособности реакторов, наличии кассет на позициях загрузки, готовности загрузочных систем к работе и т. п. Кроме этого, каждая электропечь *12* оснащена пультом оперативной информации, который показывает текущий параметр каждого реактора и позволяет задавать и корректировать программу процесса в каждом реакторе.

Зона загрузки кассет в АПЛ отделена от зоны печей и газовой системы модулями пылезащиты *1*, что обеспечивает в зоне загрузки высокие показатели производственной гигиены.

Линию обслуживает один оператор, в функции которого входят механизированная переукладка пластин из транспортных в рабочие кассеты и наоборот, пуск линии в работу и контроль за работой механизмов и агрегатов.

Другим примером такого комплексного подхода к проектированию может служить линия японской фирмы «Нихон Дэнки». Она разработала комплексную модульно-блочную линию изготовления структур полупроводниковых микросхем с охватом таких операций, как очистка поверхности, диффузия, напыление пленок, фотолитография и контроль. Линия (рис. 152) состоит из

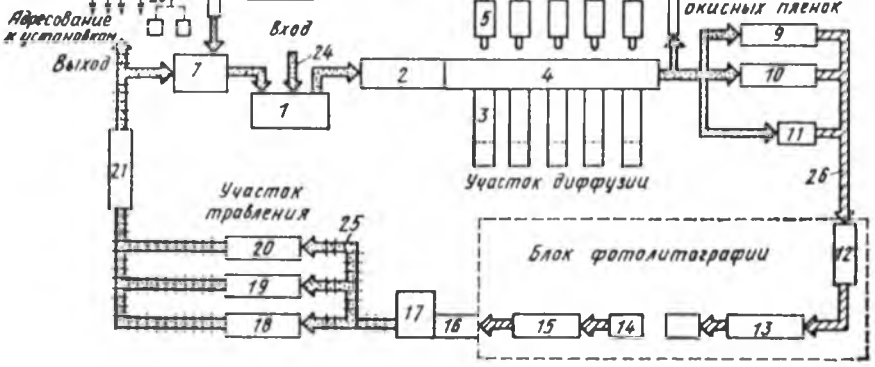


Рис. 152. Схема линии комплексной обработки пластин фирмы «Нихон Денки», Япония:

1 — шкаф для хранения; *2* — автомат промывки; *3* — диффузионные печи; *4* — тоннель очистки; *5* — загрузчики; *6* — ленточный конвейер; *7* — контрольная аппаратура; *8* — пульт управления блоком диффузии; *9* — установка непрерывного напыления; *10* — установка выращивания окисных пленок; *11* — установка перегрузки с кварцевых лотков в алюминиевые; *12* — установка термообработки; *13* — автомат нанесения фоторезиста; *14* — установка совмещения и экспонирования; *15* — автомат проявления; *16* — автомат дубления; *17* — перегрузка с алюминиевых в тефлоновые лотки; *18, 19, 20* — автоматы травления; *21* — автомат снятия фоторезиста; *22* — центральный пульт управления; *23* — промышленная телевизионная камера, *24* — кварцевые лотки; *25* — тефлоновые лотки; *26* — алюминиевые лотки

четырех автоматизированных автономных блоков-модулей, связанных транспортными средствами: промывки и травления, диффузии и окисления, образования окисных пленок (напыления), фотолитографии.

Основные технические данные линии

Число наименований оборудования, входящего в линию	22
Число операций, которыми можно управлять с центрального пульта	9
Число партий обрабатываемых пластин	200
Число разновидностей пластин в партии	100
Продолжительность обработки одной партии, дней	10—15
Число различных типов применяемых кассет	3

Обработка пластин на линии выполняется циклически, причем управление циклами осуществляется с центрального пульта управления (рис. 153).

Центральный пульт управления (ЦПУ) обеспечивает общий контроль технологического потока обрабатываемых изделий. На выходе каждого технологического блока машин имеется индикаторная панель, с помощью которой оператор может послать запрос о коде и программе технологической обработки поступающей партии и получить ответ также в виде цифрового кода. ЦПУ отвечает, кроме того, на все вопросы относительно партии пластин, проходящей обработку в данный момент. На линии можно обрабатывать до 200 партий пластин, причем в каждой партии может быть около 100 разновидностей пластин. Цикл обработки одной партии длится от 2 до 3 недель.

В блоке фотолитографии автоматически выполняются следующие операции: подача резиста, нанесение фоторезиста на пластины, подача пластин в зону сушки, сушка, предварительное

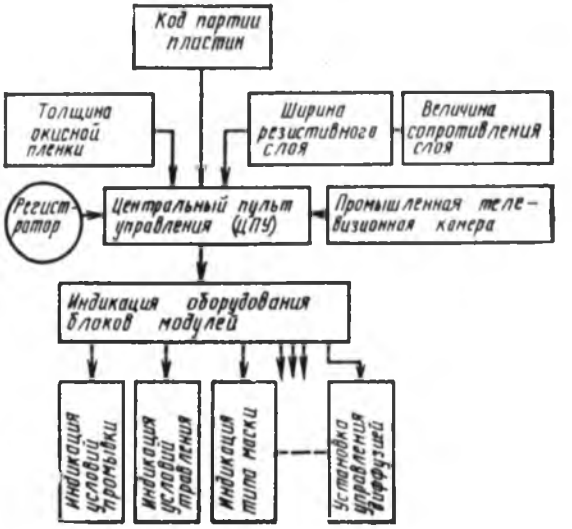


Рис. 153. Схема управления циклами линии обработки пластин

совмещение (электронно-оптическим методом), передача пластин с позиции совмещения на позицию экспонирования, съем пластин с позиции экспонирования, перегрузка в плоские кассеты, подача на установку проявления (распылением), подача пластин в зону задубливания, задубливание.

Вручную выполняют перенос пластин в устройство совмещения и точное их совмещение.

Начало операций и выбор нужного фотошаблона осуществляются по сигналам с ЦПУ. Все операции в блоке травления также начинаются по сигналам с ЦПУ. Устройства для очистки и травления сходны и по внешнему виду, и конструктивно. Они представляют собой ряд емкостей, в которые погружаются пластины в тефлоновых кассетах. Перенос пластин из емкости в емкость и выдержка времени выполняются автоматически под контролем ЦПУ.

Перед блоком диффузии имеются устройства (шкафы), обеспечивающие хранение межоперационного задела. Пластины помещают в эти устройства после классификации и укладки в кварцевые кассеты (лодочки). Подача кассет с пластинами из шкафов межоперационного хранения на конвейер тоннельной установки очистки перед диффузионными печами и разгрузка конвейера по выходе из печи осуществляются вручную. Перемещение пластин от одной печи к другой, выбор нужной печи, загрузка в печь, выдержки времени, подача газа — выполняются автоматически по сигналам с ЦПУ. Число сочетаний различных условий может достигать на этом этапе 600—800.

Выращивание окисных пленок выполняется в четырехкамерной установке с резистивным подогревом по следующему циклу: предварительный нагрев, создание слоев окиси кремния и боросиликатного стекла, охлаждение.

Всего на линии применяют три типа лотков-кассет:

в блоке промывки и травления — компактные, коррозионностойкие и устойчивые к ультразвуковым колебаниям тефлоновые кассеты;

в блоке фотолитографии — алюминиевые, плоские и цилиндрические кассеты, обеспечивающие подачу пластин без механических повреждений;

в блоке диффузии — кварцевые термоустойчивые кассеты.

Для переукладки пластин из кассеты в кассету в линии используются специальные установки. Таким образом, описываемая линия не является полностью автоматической, хотя в течение всего цикла обработки руки оператора не касаются пластин.

В линии удачно решены вопросы транспортировки: пластины от агрегата к агрегату передаются с помощью конвейера с автоматизированной перегрузкой их из одной кассеты в другую; частично решена также проблема хранения пластин для создания межоперационного задела перед блоком диффузии.

Все блоки объединены в единый автоматизированный комплекс, управляемый машиной с ЦПУ.

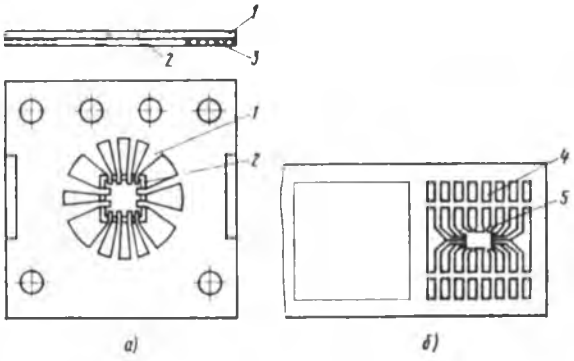


Рис. 154. Ленты для сборки микросхем:
а — гибкие; *б* — жесткие;
1 — выводы; *2* — полиимидная прокладка; *3* — полиимидная пленка; *4* — вывод; *5* — контактная площадка

Создание автоматических линий сборки непрерывного действия возможно при использовании непрерывных лент. Жесткие ленты из ковара или никеля толщиной 0,15—0,3 мм служат основой для изготовления полупроводникового прибора или микросхемы. Гибкие ленты из алюминиевой или медной фольги толщиной 25—50 мкм используют для промежуточных соединений между кристаллом и выводами корпуса (или рамки). Гибкие ленты плакируют слоем пластмассы — полиимида (толщиной 30—100 мкм), который повышает прочность ленты и позволяет сохранять взаимное расположение соединений (рис. 154). В ленте штамповкой или травлением изготавливают рамку — основу корпуса будущего прибора (рис. 154, *б*). На основе таких лент осуществляют автоматизированную сборку и герметизацию микросхем или полупроводниковых приборов. Кристаллы присоединяются непосредственно к площадкам на рамках или через промежуточную подложку. Монтаж соединений между контактными площадками кристаллов и выводами рамок выполняется проволочными перемычками или тонкой гибкой лентой — «паучком» (рис. 154, *а*). Для защиты микросхемы на рамке формуется металлокерамический корпус, который герметизируется стеклом. Более распространенным методом является герметизация прибора пластмассой, которая осуществляется заливкой или трансферным прессованием.

Схема автоматической линии сборки транзистора, конструкция которого выполнена на основе рамки, показана на рис. 155. Коваровая лента с катушки *1* роликами *2* подается в автоматический пресс *3*, который производит вырубку выводов. Затем лента обезжиривается в парах растворителя в камере *4*. В ваннах *5*, *6*, *7* концы выводов покрываются золотом и лента промывается. Затем проводится сушка в печи *8*. На позиции *9* кристалл присоединяется к базовому выводу, а в печи *10* проводится пайка.

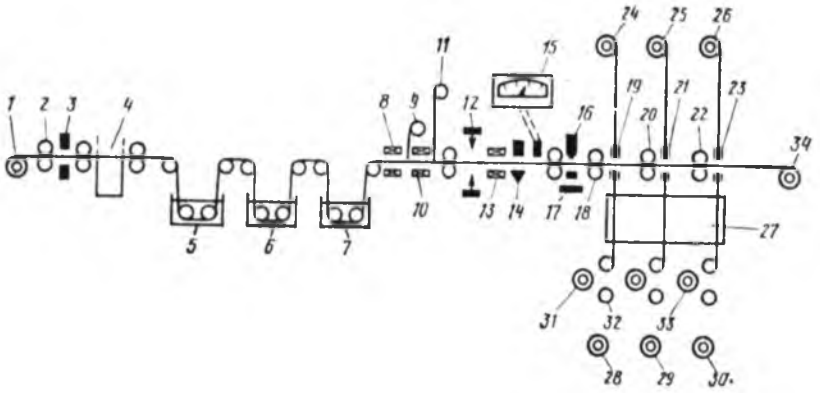


Рис. 155. Схема автоматической линии сборки транзистора

На позиции *11* термокомпрессией присоединяются гибкие перемычки. На позиции *12* к прибору приклеивается дно и крышка корпуса, по краям которых нанесен слой легкоплавкого стекла с адгезивом. В печи *13* лента проходит термообработку, при которой связывающее вещество выгорает, а стекло оплавляется и соединяет между собой дно и крышку — герметизирует прибор. Затем специальным устройством *14* выводы отделяются от рамки и проводится контроль с помощью установки *15*. Устройство *16* вырубает бракованные приборы и направляет их в бункер *17*. На маркировщиках *18, 20* и *22* годные приборы маркируются и на позициях *19, 21* и *23* перемещаются с металлической ленты на пластиковые *24, 25* и *26*, которые наматываются на катушки *28, 29, 30*. Попутно проводят сушку в шкафу *27* и упаковку прозрачной лентой *31, 32, 33*. Использованная коваровая лента наматывается на катушку *34*.

Из рассмотренных примеров видно, что уровень автоматизации линий зависит от степени отработанности технологического процесса и конструкции обрабатываемого изделия.

ГЛАВА 16

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ

1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

Для современного полупроводникового производства характерна высокая степень автоматизации основных технологических процессов, без которой невозможно обеспечить выпуск изделий в необходимых количествах и высокого качества, однако значительная часть вспомогательных операций выполняется еще вручную. Опыт показывает, что автоматизировать многие вспомогательные ручные операции традиционными средствами невозможно, поэтому возникла необходимость в создании и широком применении промышленных роботов. Промышленные роботы для полупроводникового производства должны отличаться прецизионностью, быстродействием, надежностью, малой массой и габаритными размерами, а также удовлетворять требованиям вакуумной гигиены.

Внедрение роботов в полупроводниковое производство и микроэлектронику является дальнейшим естественным процессом развития механизации и автоматизации путем создания комплексно-автоматизированных участков и цехов, управляемых от ЭВМ и позволяет полностью автоматизировать как отдельные операции, так и весь процесс производства в целом.

Наибольшее применение роботы могут найти при выполнении следующих операций:

вспомогательных — транспортные операции, загрузка и выгрузка изделий на рабочие позиции технологических машин, операций складирования;

технологических — сборка (с применением сварки и пайки), мойка, очистка, окраска и т. п.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАЗНАЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННЫХ РОБОТОВ

В настоящее время в отечественной и зарубежной промышленности используют широкую номенклатуру промышленных роботов, отличающихся по своей конструкции и структуре.

Промышленный робот является автоматической машиной, представляющей собой манипулятор с перепрограммируемым устройством управления для выполнения в производственном процессе двигательных и управляющих фукнций, заменяющих аналогичные функции человека при перемещении предметов производства и (или) технологической оснастки.

Таким образом, промышленный робот является универсальной технологической системой для выполнения разнообразных действий, производимых человеком в процессе его трудовой деятельности.

Обычно промышленные роботы в зависимости от их технологических возможностей делят на три поколения. Наиболее простыми являются роботы первого поколения, работающие по жесткой программе. Роботы второго поколения — адаптивные роботы, способны частично приспосабливаться к окружающей обстановке и не требуют точного позиционирования и ориентации деталей в связи с наличием технического зрения. Роботы третьего поколения — «разумные» роботы — способны самостоятельно принимать решения для выполнения поставленной задачи.

Различные авторы отмечают еще до 10—12-и различных классификационных признаков, отличающих роботы друг от друга (например, назначение, зона обслуживания, тип приводов, система управления, грузоподъемность и т. д.). Но, несмотря на эти различия, все конструкции роботов состоят из трех основных систем — исполнительной, управляющей и информационной, отличающихся степенью их совершенства и развития в той или иной конкретной конструкции.

Исполнительная система состоит из манипуляторов с приводными устройствами и механизма перемещения всего робота. Последний механизм может иногда отсутствовать, тогда робот будет стационарным.

Манипуляторы — многозвенные механизмы с управляемыми приводами по всем степеням подвижности. Автоматическая система управления робота приводит в движение манипуляторы и заставляет их совершать перемещения, подобные движениям рук человека в процессе его трудовой деятельности.

Робот может иметь один, два и более манипуляторов. Манипуляторы могут быть выполнены по трем схемам:

с раздельными приводами и управлением для каждого подвижного соединения звеньев, т. е. для каждой степени подвижности; схема применяется для роботов со сложной кинематикой руки, с приводами небольшой мощности;

с раздельными приводами, но зависимым управлением по одной и более степеням подвижности;

с общими приводами по двум и более степеням подвижности; чаще всего эту схему применяют при необходимости использования приводов большой мощности.

В роботах используют четыре типа приводов: электромеханический, пневматический, гидравлический и комбинированный. Для полупроводниковой промышленности одним из важнейших параметров оценки качества привода является его характеристика по вакуумной гигиене.

Манипуляторы осуществляют перемещения изделия или заготовки относительно основания. Конечное звено манипулятора — захватное устройство, предназначено для захватывания и удержа-

ния перемещаемого изделия или инструмента. Захватные устройства обычно выполняют быстросменными. Захватное устройство вместе с устройством его ориентирования называют кистью.

Одной из основных характеристик робота является число степеней подвижности, определяемое его кинематической структурой. Для удобства анализа и синтеза целесообразно кинематику робота разделить на три составные части: кинематику основания, кинематику манипулятора и кинематику кисти.

Кинематика основания. Определяется степенью подвижности всего робота относительно технологического оборудования. Практика показывает, что обычно бывает достаточным, если основание робота обладает одной степенью подвижности, т. е. обеспечивает перемещение робота от одной машины к другой. Обеспечить высокую точность позиционирования в этом случае весьма сложно и у прецизионных роботов основание необходимо делать неподвижным.

Кинематика манипулятора. Определяется степенью подвижности конца манипулятора с захватом относительно основания робота. На выбор кинематической схемы манипулятора основное влияние оказывают величина и характер необходимых перемещений захвата с изделием или инструментом в процессе его переноса.

Для перемещения объекта манипулирования в заданное место рабочей зоны необходимы три степени подвижности. Причем кинематические пары должны быть определенным образом сориентированы в пространстве, чтобы обеспечить необходимую зону обслуживания.

Увеличение числа степеней подвижности манипулятора до четырех способствует улучшению маневренности робота и позволяет реализовать более сотни различных структурных вариантов кинематических схем. Однако при этом может снизиться точность позиционирования.

Кинематика кисти. Кинематика кисти должна обеспечить ориентирование транспортируемых деталей при их установке в заданное положение. Поэтому она в значительной степени зависит от кинематики манипулятора, т. е. от траектории перемещения детали из начального положения в конечное, и типа примененных в нем кинематических пар. Применение в манипуляторе вращательных пар с подвижностью относительно различных осей требует применения в кинематике кисти такого же количества вращательных пар, что и в манипуляторе со степенями подвижности относительно тех же координатных осей. Это необходимо для обеспечения кистью соответствующей ориентации деталей по угловым положениям.

Детали на технологическом оборудовании в основном устанавливаются с горизонтальным или вертикальным расположением осей. Поэтому кисть, имеющая две вращательные степени подвижности относительно этих осей, будет достаточно универсаль-

ной. Кисть манипулятора робота обычно содержит в себе и привод захвата. Движения элементов захвата в общее число степеней подвижности робота не включают, так как они не изменяют пространственного положения детали.

Таким образом, кинематическую структуру промышленных роботов с одним манипулятором и одним захватом можно описать следующей структурной формулой:

$$n = n_{oc} + n_{м} + n_{к},$$

где n— общее число степеней подвижности робота; n_{oc}; $n_{м}$; $n_{к}$ — соответственно число степеней подвижности основания, манипулятора и кисти.

Опыт промышленной эксплуатации роботов показывает, что достаточной универсальностью обладают те из них, которые имеют 5—7 степеней подвижности.

Универсальными могут быть как подвижные, так и стационарные роботы с тремя степенями подвижности манипулятора и двумя-тремя степенями подвижности кисти.

Меньшее число степеней подвижности могут иметь специальные или специализированные роботы, а большее — высокоманевренные.

Важной характеристикой робота является его рабочая зона. Рабочая зона *3* (рис. 156) — это пространство, в котором может находиться рабочий орган (захват *2*) манипулятора *1* промышленного робота при его функционировании и зафиксированном положении устройства передвижения основания. Она определяется числом степеней подвижности, типом кинематических пар, их

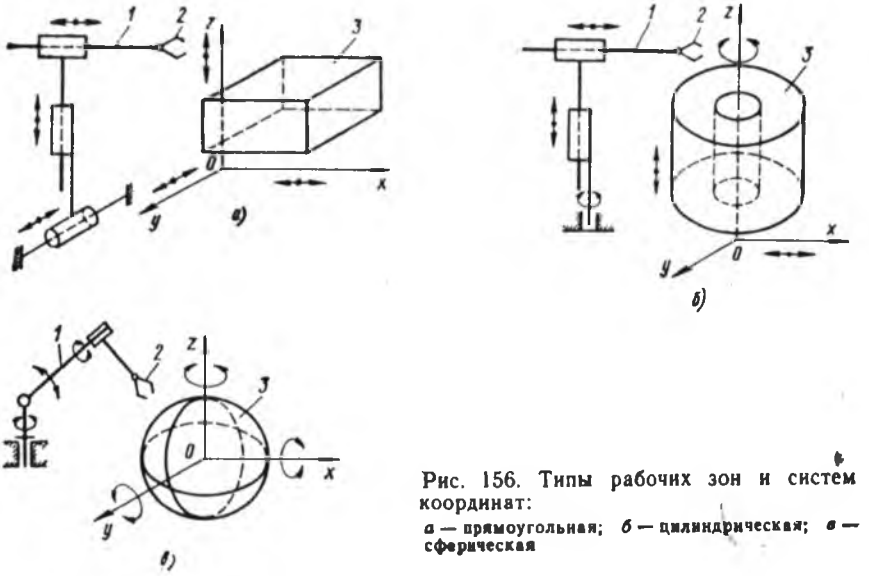


Рис. 156. Типы рабочих зон и систем координат:
а — прямоугольная; *б* — цилиндрическая; *в* — сферическая

взаимной ориентацией в пространстве и относительными размерами звеньев манипулятора. Возможны следующие типы рабочих зон: плоскость, поверхность, параллелепипед, цилиндр, шар и комбинированные. Тип рабочей зоны зависит от используемых в конструкции кинематических пар и последовательности их расположения. Каждому типу рабочей зоны соответствует своя система координат — прямоугольная (рис. 156, *а*), цилиндрическая (рис. 156, *б*), сферическая (рис. 156, *в*), угловая и другие.

Номинальная грузоподъемность робота определяется максимальной массой детали или инструмента, которую может поднять и удержать робот своим захватом, при обеспечении установленных значений его эксплуатационных характеристик. Это весьма важно для машиностроительного производства, но для полупроводникового производства, оперирующего с изделиями незначительной массы, грузоподъемность — не главный показатель. На основе анализа машиностроительных деталей разработана классификация роботов по грузоподъемности. Их делят на сверхлегкие, легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые. Однако в полупроводниковом производстве применяют главным образом сверхлегкие, легкие и иногда средние роботы (табл. 15).

Таблица 15. **Грузоподъемность промышленных роботов, применяемых в полупроводниковом производстве**

Тип робота	Грузоподъемность, кг	Назначение
Сверхлегкий	0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0	Перемещение изделий основного производства
Легкий	1,6; 2,5; 6,3; 10,0	
Средний	16; 25; 40; 63; 100	Перемещение деталей в электронном машиностроении и в транспортно-перегрузочных системах

Для полупроводникового производства и микроэлектроники при необходимости могут быть разработаны роботы и меньшей грузоподъемности, чем 0,1 кг.

Погрешность позиционирования определяется отклонением фактического положения захвата манипулятора от заданного управляющей программой при выходе захвата в точку рабочей зоны или при воспроизведении заданного контура. На этот показатель влияет суммарная погрешность позиционирования всех исполнительных механизмов, приведенная к фактическому положению объекта манипулирования.

Погрешность позиционирования может оцениваться в линейных или угловых единицах. Для роботов, используемых в микроэлектронике, допустимая погрешность позиционирования очень часто должна быть существенно меньше $\pm 0{,}1$ мм.

Управляющие системы. Цель системы программного автоматического управления роботом — обеспечить перемещение в рабочей зоне захвата манипулятора по заранее заданной траектории. Эта цель может быть достигнута применением различных по сложности и совершенству управляющих систем, например, использованием относительно простых цикловых, позиционных или контурных систем для роботов первого поколения, или сложных адаптивных систем с управлением от ЭВМ для роботов второго и третьего поколений. По компоновочному решению системы управления могут быть выполнены в виде автономного пульта или блока управления, встроенного в корпус робота.

Системы управления могут быть также индивидуальные для управления одним роботом и групповые для управления группой роботов, используемых совместно с технологическим оборудованием.

Информационные системы состоят из датчиков и устройств обработки поступающей информации. Она в значительной мере определяет функциональные возможности, сложность решаемых роботами задач и обеспечивает безопасность обслуживающего персонала. Функционально информационная система обеспечивает: восприятие внешней среды, контроль состояния робота и технику безопасности Обычно датчики устанавливают на захвате и в подвижных звеньях манипулятора.

Промышленный робот состоит из большого числа функциональных механизмов и элементов, поэтому пространственная компоновка их в работах многовариантна.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РОБОТАМ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Производство полупроводниковых приборов и интегральных микросхем — комплекс разнообразных, значительно отличающихся по своей сущности и условиям проведения технологических операций. Так, например, при изготовлении корпусов приборов или резке слитков и шлифовке пластин требования к вакуумной гигиене в производственных помещениях несколько снижены. Обычно эти операции проводятся в помещениях третьей-пятой категорий вакуумной гигиены. Поэтому на заготовительной стадии производства к оборудованию не предъявляют очень высоких требований в отношении ограничения генерации пылевых частиц. В связи с этим в цехах наряду с технологическим оборудованием применяют и обычные роботы, используемые в приборо- и машиностроительных отраслях промышленности. К таким роботам предъявляют, главным образом, требование исключения механических повреждений обрабатываемых изделий, ко-

нечно, при условии, что они имеют соответствующие характеристики по габаритным размерам, точности, грузоподъемности, зоне обслуживания и т. д.

Несколько более высокие требования предъявляют к помещениям, а следовательно, и к оборудованию сборочно-контрольной стадии производства. В этом случае производство изделий осуществляется в помещениях второй или третьей категории по вакуумной гигиене. На качество собранных приборов могут влиять влага, аэрозоли, находящиеся в воздухе, и состав среды, образующейся внутри корпуса, поэтому сборку приборов часто осуществляют в защитной среде инертного газа.

Соответствующие требования, исключающие возможность появления и попадания внутрь прибора вредных для него веществ, предъявляют и к технологическому оборудованию. Это же относится и к роботам, которые предполагается использовать на сборочно-контрольных операциях. Очень осторожно следует относиться к применению роботов с пневмоприводом и пневмоавтоматикой, так как используемый для этих целей воздух пневмосетей содержит большое количество влаги и масла, избавиться от которых практически невозможно даже применением специальных устройств для его очистки. По этим причинам выброс его в атмосферу цеха становится нежелательным. Наивысшие же требования предъявляют к технологическому оборудованию и роботам, используемым в структурообразующем этапе производства, т. е. в стадии формирования активных областей внутри полупроводникового кристалла. Здесь наряду с повышенной точностью к роботам предъявляют требование минимальной генерации пылевых или аэрозольных частиц в атмосферу чистого помещения. Максимально допустимые число и размеры этих частиц регламентируются соответствующими нормами и не должны превышать величин, указанных в табл. 1. Естественно, робот в процессе его функционирования, по крайней мере, в пределах зоны его действия, не должен ухудшать этих характеристик.

Итак, первым и важнейшим требованием к роботам, предназначенным для применения в чистых помещениях, является соответствие числа генерируемых пылевых и аэрозольных частиц стандарту по вакуумной гигиене для помещения, в котором предполагается его эксплуатировать.

Так, например, некоторые зарубежные фирмы считают, что в помещениях, относящихся по вакуумной гигиене к первой категории, могут использоваться роботы, испускающие не более 360 частиц на кубический метр воздуха в минуту размером не более 0,5 мкм. Однако достичь этих показателей чрезвычайно трудно. Робот, как и всякая производственная машина, состоит из большого числа перемещающихся друг относительно друга деталей, кинематических пар, механизмов, пневматических, гидравлических или электромеханических приводных устройств и т. д. Все эти элементы, хотя и медленно, но изнашиваются в процессе работы, а выход газа от пневмоприводов и пневмоавтоматики обыч-

но осуществляется прямо в атмосферу цеха. Продукты износа, смазки и выхлопа — это и есть те загрязняющие чистое помещение пылевые и аэрозольные частицы, от которых необходимо избавиться.

Большинство роботов, выпускаемых в настоящее время для нужд приборо- и машиностроительной промышленности, не имеет устройств защиты от генерируемых роботом пылевых частиц. Если же робот и имеет какие-либо защитные кожухи, то их основное назначение прямо противоположно тому, что требуется для полупроводникового производства и микроэлектроники. Эти кожухи предназначаются в основном для защиты механизмов робота от пыли и придания ему надлежащего внешнего вида. Они не герметичны, многие кожухи при выполнении роботом своих функций работают как кузнечные меха, выдувая образовавшиеся внутри него частицы в атмосферу помещения цеха и, более того, сами являются источниками загрязнения, испуская довольно интенсивный поток частиц. Но потребность в роботах для использования в чистых помещениях определяет необходимость в доработке и использовании существующих конструкций. С этой целью иногда выпускают набор деталей для переоснащения некоторых моделей роботов. В эти наборы входят различные рукава для выдвижных элементов, уплотнительные кольца, герметизаторы, трубы с соответствующими соединениями, спроектированные с целью улавливания пылевых и аэрозольных частиц, выделяемых механизмами, выхлопом от пневмосистем и другими источниками загрязнений. По имеющимся данным, такой набор защитных элементов позволяет уменьшить эмиссию в окружающую среду частиц диаметром до 0,5 мкм до уровня, меньшего 1850 частиц на кубический метр в минуту. Но все же это не основное направление в конструировании роботов для полупроводникового производства. Поэтому необходимо специально создавать изделия для работы в чистых помещениях, проектируя их таким образом, чтобы они не испускали загрязняющих частиц.

Конструкция «чистого робота», естественно, значительно отличается от обычного робота. Эти отличия заключаются в полной ликвидации или сведении к минимуму числа трущихся поверхностей, герметизации их рукавами из малопылящих материалов, герметизации механических узлов типа редукторов, зубчатых передач, муфт и других элементов с целью локализации распространения продуктов износа и применения специальных конструктивных элементов, например таких, как мембраны, сильфоны, пневматические пружины и т. п. Эти элементы имеют сравнительно небольшой рабочий ход, но он может быть вполне достаточным для перемещения рабочего органа или другого звена робота, закрепленного на них без каких-либо передаточных устройств, а только за счет упругой деформации.

Схемы устройства перемещения с использованием мембраны, сильфона и трубчатой пружины (трубки Бурдона) показаны на рис. 157.

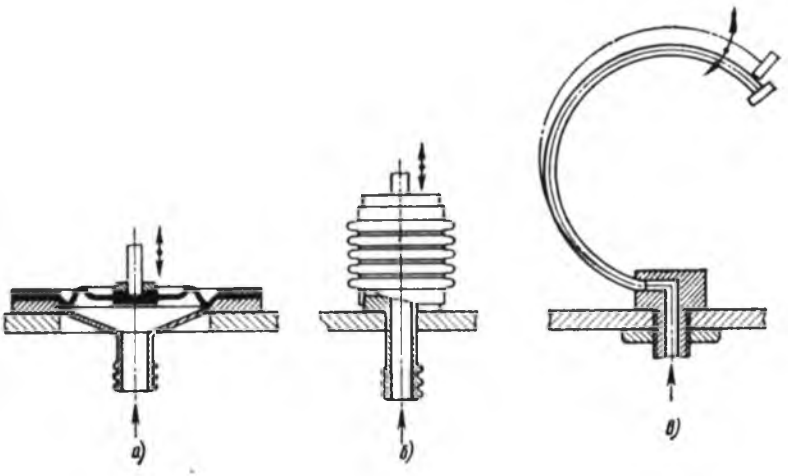


Рис. 157. Устройства перемещения:
а — мембранное; *б* — сильфонное; *в* — с трубчатой пружиной

Выброс отработанного воздуха должен производиться в специальные трубопроводы, отводящие его из чистого помещения.

Большую роль в создании «чистых роботов» играют используемые материалы и технология их обработки. Металлические детали и узлы конструкции обрабатывают так, чтобы сократить до минимума возможность отслаивания чешуек материала. Для этих целей пригодны полировка и плотное зеркальное гальваническое покрытие. Совершенно недопустима коррозия каких-либо деталей. Высокие требования предъявляют и к лакокрасочным покрытиям. Лак и краски, применяемые для окраски строительных конструкций в гермозонах, а таже лакокрасочные покрытия для роботов должны быть стойкими, иметь хорошее сцепление с окрашиваемыми деталями, не шелушиться, не набухать и не вспучиваться во влажной атмосфере, а также не генерировать пылевых частиц.

Неметаллические материалы для различных уплотнений, кожухов и рукавов также должны оцениваться в отношении минимума выделения частиц в атмосферу чистого помещения.

Итак, в полупроводниковом производстве промышленные роботы в том исполнении, которое принято в приборо- и машиностроении, можно применять только на заготовительном этапе производства. Для сборочной стадии роботы необходимо модернизировать с целью снижения числа посторонних частиц, выделяемых в атмосферу чистого помещения, а для структурообразующего этапа производства больших и сверхбольших интегральных схем необходимо создавать новые «чистые роботы», требования к которым по ряду параметров несоизмеримо выше требований, предъявляемых к роботам в общепринятом понимании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аброян И. А., Андронов А. П., Титов А. И.** Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 320 с.

2. **Андреев В. М., Долгинов Л. М., Третьяков Д. Н.** Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Советское радио, 1975. 328 с.

3. **Барил М. А., Самойликов В. К.** Газовые системы оборудования производства полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Энергия, 1978. 112 с.

4. **Бочкин О. И., Брук В. А., Никифорова-Денисова С. Н.** Механическая обработка полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа, 1977. 149 с.

5. **Булкин А. Д., Якивчик Н. И.** Технология и оборудование производства силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 255 с.

6. **Вакуумные** сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники/И. Г. Блинов, А. М. Дороднов, В. Е. Минайчев и др. М.: Электроника, вып. 7 и 8, 1974, 159 с.

7. **Волчкевич Л. И., Ковалев М. П., Кузнецов М. М.** Комплексная автоматизация производства. М.: Машиностроение, 1983. 269 с.

8. **Ермаков Е. С.** Роботы и манипуляторы электронной техники. М.: Высшая школа, 1983. 96 с.

9. **Ефимов И. Е., Козырь И. Я.** Основы микроэлектроники. М.: Связь, 1975. 272 с.

10. **Иванов А. А.** Проектирование систем автоматического манипулирования миниатюрными изделиями. М.: Машиностроение, 1981. 271 с.

11. **Камышный Н. И.** Автоматизация загрузки станков. М.: Машиностроение, 1977. 288 с.

12. **Киреев В. Ю., Данилин Б. С., Кузнецов В. И.** Плазмохимическое и ионно-химическое травление микроструктур. М.: Радио и связь, 1983. 126 с.

13. **Китайгородский Ю. И., Яхимович Д. Ф.** Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. М.: Машиностроение, 1982. 56 с.

14. **Козырев Ю. Г.** Промышленные роботы. Справочник. М.: Машиностроение, 1983. 375 с.

15. **Корнилов Р. В., Сандеров В. Л.** Расчет комплексов оборудования микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 104 с.

16. **Крапухин В. В.** Печи для цветных и редких металлов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.

17. **Крапухин В. В., Соколов И. А., Кузнецов Г. Д.** Физико-химические осно-

вы технологии полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1982. 352 с.

18. **Красулин Ю. Л., Назаров Г. В.** Микросварка давлением. М.: Металлургия, 1976. 160 с.

19. **Кривандин В. А., Филимонов Ю. Л.** Теория конструкции и расчеты металлургических печей. т. I, М.: Металлургия, 1978.

20. **Кузнецов В. И., Немилов Н. Ф., Шемякин В. Е.** Эксплуатация вакуумного оборудования. М.: Энергия, 1978. 207 с.

21. **Курносов А. И.** Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных схем. М.: Высшая школа, 1980. 327 с.

22. **Курносов А. И., Юдин В. В.** Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1979. 367 с.

23. **Лабунов В. А., Данилович Н. И.** Современные системы ионной имплантации. Зарубежная электронная техника, Вып. 3 (249). М.: ЦНИИ «Электроника», 1982, с. 3—102.

24. **Лабунов В. А., Данилович Н. И., Грошов В. В.** Многопучковые ионные источники для систем ионного травления — распыления. Зарубежная электронная техника, Вып. 5 (251). М.: 1982, ЦНИИ «Электроника», 1982, с. 82—120.

25. **Лабунов В. А., Рейсс Г.** Ионно-лучевые источники для обработки поверхности твердых тел и получения тонких пленок. Зарубежная электронная техника, Вып. 1 (247), М.: ЦНИИ Электроника, 1982, с. 3—42.

26. **Линчевский Б. В.** Техника металлургического эксперимента. М.: Металлургия, 1979. 256 с.

27. **Лодиз Р., Паркер Р.** Рост монокристаллов. М.: Мир, 1974. 540 с.

28. **Минайчев В. Е.** Вакуумные крионасосы. М.: Энергия, 1976. 151 с.

29. **Моряков О. С.** Устройство и наладка оборудования и полупроводникового производства. М.: Высшая школа, 1981. 336 с.

30. **Мягков А. Т., Корсетов Е. М.** Химико-технологическая аппаратура микроэлектроники. М.: Энергия, 1979. 312 с.

31. **Назаров Г. В., Гревцев Н. В.** Сварка и пайка в микроэлектронике. М.: Советское радио, 1969. 192 с.

32. **Нашельский А. Я.** Технология полупроводниковых материалов. М.: Металлургия, 1972. 432 с.

33. **Николаев И. М.** Оборудование и технология производства полупроводниковых приборов. М.: Высшая школа, 1977. 269 с.

34. **Оборудование** полупроводникового производства/П. Н. Масленников, К. А. Лаврентьев, А. Д. Гингис и др. Под редакцией П. Н. Масленникова. М.: Радио и связь, 1981. 336 с.

35. **Робототехника** /Ю. Д. Адрианов, Э. П. Бобриков, В. Н. Гончаренко и др. Под редакцией Е. П. Попова, Е. И. Юрьевича. М.: Машиностроение, 1984. 288 с.

36. **Розанов Л. Н.** Вакуумные машины и установки. Л.: Машиностроение, 1975. 336 с.

37. **Современные** магнетронные распылительные устройства/ В. А. Лабунов, Н. И. Данилович, А. С. Уксусов, В. Е. Минайчев. Зарубежная электронная техника. Вып. 10 (256), М.: ЦНИИ «Электроника», 1982, с. 3—62.

38. **Степаненко И. П.** Основы микроэлектроники. М.: Советское радио, 1980. 424 с.

39. **Сысоев В. В.** Автоматизированное проектирование линий и комплектов оборудования полупроводникового и микроэлектронного производства. М.: Радио и связь, 1982. 120 с.

40. **Технология** и аппаратура газовой эпитаксии кремния и германия/ И. М. Скворцов, И. И. Лапидус, Б. В. Орион и др., М.: Энергия, 1978. 134 с.

41. **Уфимцев В. Б., Акчурин Р. Х.** Физико-химические основы жидкофазной эпитаксии. М.: Металлургия, 1983. 222 с.

42. **Черняев В. Н., Кожитов Л. В.** Технология эпитаксиальных слоев арсенида галлия и приборы на их основе. М.: Энергия, 1974.

43. **Чистяков Ю. Д., Райнова Ю. П.** Физико-химические основы технологии микроэлектроники. М.: Металлургия, 1979. 408 с.

44. **Шаумян Г. А.** Комплексная автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 1973. 639 с.

45. **Шашков Ю. М.** Выращивание монокристаллов методом вытягивания. М.: Металлургия, 1982. 312 с.

46. **Электронно-лучевая** технология в изготовлении микроэлектронных приборов/Дж. Р. Брюэр, Д. С. Гринич, Д. Р. Херриот и др. Под ред. Дж. Р. Брюэра: Перевод с англ. М.: Радио и связь, 1984. 336 с.

47. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов (в двух томах)/Б. А. Артамонов Ю. С. Волков, В. И. Дрожалова и др./Под ред. В. П. Соломенцева. М.: Высшая школа, 1983, т. I, 247 с., т. II, 208 с.

А

Автоматическая линия
— — с гибкой связью
— — с жесткой связью
— — разделенная на участки
Автоматическая линия сборки транзисторов
Автоматизированная поточная линия диффузии
— — — — функциональный состав
— — — — конструктивное исполнение
— — — — устройство смены кассет
— — — — модули пылезащиты
Агрегат
Адаптивные сварочные работы
Аппаратура газовых систем
— — — фильтры
— — — дозаторы
— — — смесители
— — — регуляторы давления
— — — регулятор расхода
— — — ротаметр
— — — трубопроводы
АСУТП наращивания эпитаксиальных структур

Б

Быстрота действия насоса

В

Вакуум
— низкий
— средний
— высокий
— сверхвысокий
Вакуумная система
— — схема
— — элементы
— — расчет
— — классификация
— — проектирование
Вакуумные насосы
— — механические с масляным уплотнением
— — диффузионные
— — турбомолекулярные
— — магниторазрядные
— — криогенные
Вибрационная обработка
— с промышленной частотой
— с УЗ частотой
Вихревые токи
— — глубина проникновения
Вода деионизированная
— — марки
— — удельное сопротивление
Выращивание монокристаллов
— — методом Чохральского
— — методом Бриджмена

Г

Газовое травление
— — особенности конструирования систем
Газовые системы
Генератор для ВЧ нагрева
— электромашинный
— ионный
— тиристорный
— искровой
— ламповый
Гермозона
Градиент
— осевой
— радиальный

Д

Датчики процесса
— расхода водорода
— концентрации паров
— высокочастотной мощности
Диодные системы травления
— — — с катодной связью
— — — с анодной связью
Диффузный комплекс
— — требования к конструкции
— — применяемые материалы
— — состав

Диффузия
— коэффициент диффузии

И

Индуктор
— конструкция
— применение
Индукционный нагрев
— — — область применения
Интенсификация процесса очистки
— — — гидромеханическим воздействием
— — — гидравлическим воздействием
— — — подогревом реагента
— — — применением вибраций
— — — применением мешалок
Ионная имплантация
— — на установках с доускорением
— — на установках с послеускорением
— — элементы систем
— — параметры систем
— — дефектность решетки
Ионные источники
Ионное травление
— — ионно-плазменное
— — ионно-лучевое
— — ионно-химическое
Ионно-лучевая литография
Испытания на герметичность
Источники теплового излучения
— — — резистивные
— — — газоразрядные
Источник распыления
— — резистивный
— — электронно-лучевой
— — диодный
— — триодный
— — магнетронный

К

Кассета жидкофазной эпитаксии
— — — поршневая
— — — горизонтальная с поршневой частью
Кинетика нагрева пластин
Классификация производственных помещений
— — — по микроклимату
— — — по чистоте воздушной среды
Классификация шлифовальных станков
Комплекс оборудования
— — состав
— — унификация
Конструкции узлов сборочного оборудования
— — — — рабочего столика
— — — — механизма давления
— — — — механизма подачи и обрезки проволоки
— — — — манипулятора
— — — — механизма подачи кристаллов
— — — — системы наблюдения
— — — — рабочего инструмента
Компановка автоматических линий
Конструкция теплового узла
Контроль геометрических параметров пластин
Криогенный насос

Л

Линия
— поточная
— механизированная
— комплексно-механизированная
— автоматизированная
— непрерывно-поточная
— прерывно-поточная
— с жестким ритмом
— со свободным ритмом
— однопредметная
— многопредметная

М

Магнитный поток
Магниторазрядный насос
Магнитострикционные излучатели
Максимальное (критическое) выпускное давление насоса
Методы направленной кристаллизации
— — — Бриджмена
— — — Чохральского
— — — зонной плавкой
— — — вертикальной безтигельной зонной плавкой
Методы контроля соединений
— — — разрушающие
— — — не разрушающие
— — — критерии оценки качества
Методы нанесения фоторезиста
Методы осаждения пленок в вакууме
Методы производства
— — непоточный
— — поточный
Методы деления линий на участки
Мешалки
— лопастные
— пропеллерные
— турбинные
Микроскопы контрольные — шины
Механические насосы

Н

Нагрев
— индукционный

— — коэффициент трансформации
— — КПД
— — удельная мощность
— резистивный
— электронно-лучевой
— — — удельная мощность
— лазером
— плазмой
— лучистый
— — характеристики источников излучения
— — КПД
Нагревательные элементы
— — графитовые
— — из проволоки
— — из ленты
Наибольшее рабочее давление насоса
Нагреватель проточный
— — структура
— толщина
Нарушенный слой

О

Оборудование для очистки
— — — установки
— — — агрегаты
— — — периодического действия
— — — непрерывного действия
— — — с проточными камерами
— — — — — прямоточными
— — — — — противоточными
— — — узловой состав
— — — требования к конструкции
Ориентация слитков
— — оптическим методом
— — рентгеновским методом
— — точность
Особенности полупроводникового производства
Откачка химически активных газов
Очистка
— обезжириванием
— травлением
— отмывкой

П

Перемешивающие устройства
— — типы
— — эффективность
— — равномерность перемешивания
— — конструктивные характеристики
Перспективные способы сборки микросхем
— — — — с шариковыми выводами
— — — — со столбиковыми выводами
— — — — с балочными выводами
— — — — с промежуточной подложкой
— — — — с «паучковыми» выводами
Печи сопротивления
— — прямого нагрева
— — косвенного нагрева
Плазма
— свойства
— параметры
— низкотемпературная
Предельное осаточное давление
Производительнось насоса
Плазмохимическое травление
— — анизотропия
Планетарный механизм шлифовального станка
Полировальные станки
Полирование
— электрохимическое
— химико-динамическое
Поточная линия
Полуавтомаическая (автоматизированная) линия
Промышленный робот
— — технологические возможности
— — исполнительная система
— — — — манипулятор
— — — — — — схемы выполнения приводов
— — кинематика основания
— — кинематика манипулятора
— — кинематика кисти
— — число степеней подвижности
— — рабочая зона
— — грузоподъемность
— — погрешность позиционирования
— — управляющая система
— — информационная система
Проявление фоторезиста
Пылезащитная камера
— — для обычных операций
— — для химических операций
Пылезащитная линия
Пьезокерамнческие УЗ излучатели
— материалы
— типы
— мощности излучения

Р

Рабочие жидкости диффузионных насосов
Распылители (форсунки)
— невматические
— гидравлические
— механические
Реакторы газовой эпитаксии
— горизонтальный
— вертикальный
Реакторы жидкофазной эпитаксии
Резка монокристаллов
— — диском с внутренней алмазной режущей кромкой

— — крепление инструмента
— — преимущества
— — режимы резания
— — режущий инструмент
— — стойкость инструмента
— — схема резки
Рентгенолитография
— длина волны излучения
— источники геометрических искажений
Рефлекторы
— — цилиндрические
— — параболические
— — плоские
Репрограммируемые сварочные роботы
Роботы
— области применения
— общего назначения
— для чисых помещений

С

Сварочная установка (механизмы
— — рабочий столик
— — механизм давления
— — механизм подачи и обрезки проволоки
— — манипулятор
— — механизм подачи кристаллов
— — система наблюдения
Сборочные машины
Система ионно-лучевого транспорта
Система нагрева
Системный подход к проектированию
Скорость вытягивания
Соединения в микросхемах
— — — размеры
— — — требования
— — — материалы
Способы резки монокристаллов
Стадии полупроводникового производства
— — — заготовительная
— — — структурообразующая
— — — сборочно-контрольная
— — — характерисики
Станки одностороннего шлифования
Станки двустороннего шлифования
Структурно-технологическая схема производства микросхем
Сухая очистка
— — физическим методом
— — — — — отжигом
— — — — — ионным распылением
— — химическим методом
Схемы компоновки станков резки слитков

Т

Тенденции развития оборудования микроэлектроники
Тепловой КПД печи
Тепловые потоки
— — кристалла
— — расплава
Теплота кристаллизации
Термическое окисление
Термообрабока фоторезиста
— — термокомпрессионная
— — ИК-излучением
Техническая система предприятия
— — — компоненты
— — — место среди других систем
— — — уровни развития
Технологически чистая поверхность
Травление
— химическое
— химико-динамическое
— динамическое
— полирующее (см. ионное травление)
Требования к оборудованию с использованием пылезащитных устройств
Токи высокой частоты
Турбомолекулярный насос

У

Удельная поверхностная мощность
Установка
Установка вакуумного напыления
— — — конструкционные материалы
— — — испарители
— — — вакуумная система
— — — подложкодержатель (барабан)
— — — системы вращения барабана
Установка совмещения и экспонирования
— — — — механизм поштучной выдачи пластин
— — — — механизм вертикальных перемещений пластин
— — — — осветитель
Устройства ускорения ионов
Ультразвуковые излучатели
— — методы крепления
— — назначение
— — пьезокерамические
— — — материалы
— — — мощности излучения
— — — многослойные
— — магнитострикционные
— — рабочие температуры
— — интенсивность излучения
— — повышенной частоты

Ф

Фотолитография
— контактная

— с зазором
— проекционная
Фоторезист
— негативный
— позитивный
— термокомпрессионная сушка 227
— ИК-сушка
Фронт кристаллизации

Ц

Центрифуга для нанесения фоторезиста
— — — — на одну пластину
— — — — на группу пластин
Центрифуги для химической обработки
— — — — области применения
— — — — приводы вращения
— — — — конструкции узлов крепления пластин
— — — — конструкции узлов обработки

Ч

Чистая комната
Чистота отмывки (методы контроля)
Чистый коридор
Чистый робот
— — выбор материалов
— — выбор методов обработки
— — выбор покрытий
— — выбор конструктивного исполнения

Ш

Шероховатость поверхности
Шлифование
— одностороннее
— двустороннее
— врезное
— торцевое

Э

Экранировка
— закрытая
— открытая
— активная
— пассивная
Электродвижущая сила
Электронная пушка
Электронный луч
— параметры
— баланс мощности
Электронно-лучевая литография
— — растровым сканированием
— — векторным сканированием
— — разрешающая способность
— — производительность
— — методы совмещения
— — область применения

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Иван Григорьевич Блинов,
Лев Васильевич Кожитов

ОБОРУДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Редактор Л. П. Строганов
Художественный редактор С. С. Водчиц
Технические редакторы А. С. Давыдова, Л. А. Макарова
Корректоры Н. Г. Богомолова и Л. Л. Георгиевская

ИБ № 4229

Сдано в набор 10.11.85. Подписано в печать 13.03.86. Т-04900. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,5. Усл. кр.-отт. 16,5. Уч.-изд. л. 18,32. Тираж 11 000 экз. Заказ 824. Цена 1 р.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение», 107076, Москва, Стромынский пер., 4

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 109088, Москва, Южнопортовая ул., 24.