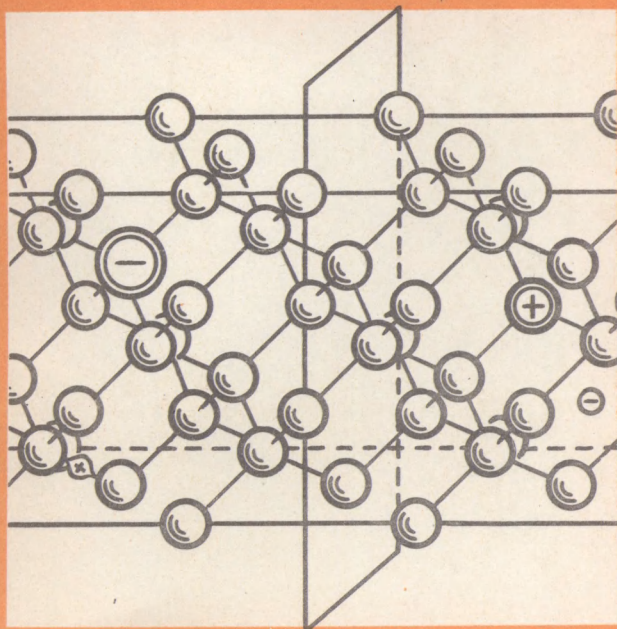


О.С. МОРЯКОВ

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ в микроэлектронике



ПРОФЕССИОНАЛЬНО-
ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБРАЗОВАНИЕ



О.С. МОРЯКОВ

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ в микроэлектронике

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профессионально-техническому образованию
в качестве учебника для средних
профессионально-технических училищ



Москва «Высшая школа» 1987



Scan AAW

ББК 32.852
М 79
УДК 621.38

Рецензент — канд. техн. наук А.П. Бобров

Моряков О.С.

М 79 Термические процессы в микроэлектронике: Учеб. для сред.
ПТУ. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1987. — 199 с.:
ил.

В книге описаны процессы изготовления полупроводниковых приборов и микросхем диффузией, планарной и эллиптической технологией, а также нанесения эпитаксиальных, диэлектрических и металлических пленок. Рассмотрено технологическое оборудование.

Третье издание (2-е — в 1980 г. "Вакуумно-термические и термические процессы в полупроводниковом производстве") дополнено материалом по основным термическим процессам, а также сведениями об их комплексной автоматизации

М $\frac{2403000000 - 012}{052 (01) - 87}$ 50 — 87

ББК 32.852
6Ф0.32

© Издательство "Высшая школа", 1974
© Издательство Высшая школа", 1987, с изменениями

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986–1990 годы и на период до 2000 года предусматривается выпуск опережающими темпами высоконадежных систем промышленной автоматики для управления технологическими процессами, малых электронно-вычислительных машин высокой производительности, систем числового программного управления для многофункциональных станков, гибких производственных модулей.

Основой систем автоматики и вычислительной техники являются изделия микроэлектроники — полупроводниковые приборы и микросхемы. Среди многочисленных технологических процессов, используемых при производстве этих приборов и микросхем, одно из ведущих мест занимают термические процессы.

Термическими называют процессы, связанные с нагревом деталей и полуфабрикатов в вакууме, жидкости или газовой среде. Такими процессами в производстве изделий микроэлектроники являются сплавление, диффузия, эпитаксия, окисление, нанесение в вакууме различных пленок. Электронно-лучевая, ионная, плазменная и лазерная обработка также относятся к термическим процессам. Кроме того, с термической обработкой связаны некоторые операции сборки приборов и микросхем, изготовления и герметизации их корпусов (монтаж кристаллов на ножки, соединение электродных выводов с контактными площадками кристаллов и выводами ножек, получение спаев стекла с металлами, термообработка керамики, сварка, пайка).

С помощью термических процессов получают полупроводниковые приборы — диоды и транзисторы, а также активные (диодные и транзисторные структуры) и пассивные (резисторы, конденсаторы, токопроводящие дорожки и др.) компоненты микросхем. Полупроводниковая пластина (кристалл), последовательно проходя ряд термических, химических и других технологических операций, приобретает необходимые физические свойства.

Производство изделий микроэлектроники нуждается в высококвалифицированных специалистах — операторах диффузионных, эпитаксиальных, элионных и вакуумно-напылительных процессов, для подготовки которых в средних профессионально-технических училищах предназначена данная книга.

Автор выражает благодарность канд. техн. наук А.П. Боброву и др. техн. наук, проф. А.Т. Александровой за полезные рекомендации, высказанные ими при рецензировании учебника, а также предприятиям электронной промышленности, предоставившим материал для работы над книгой.

Все пожелания и замечания направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство "Высшая школа".

Автор

ВВЕДЕНИЕ

Успехи, достигнутые микроэлектроникой, определяются прежде всего возможностями и уровнем развития технологии на всех этапах изготовления полупроводниковых приборов и микросхем — от производства основных и вспомогательных материалов до выполнения заключительных операций сборки, маркировки и упаковки готовых изделий.

Термические процессы предназначены для создания на поверхности и в объеме полупроводниковых кристаллов и пластин активных структур — электронно-дырочных переходов, а также для нанесения тонких и толстых пленок, слоев металлизации, защитных покрытий.

Полупроводниковые приборы и микросхемы, основой которых являются *p-n*-переходы, способны выпрямлять переменный ток, преобразовывать частоту электрических колебаний, генерировать и усиливать их, а также мощность, детектировать, стабилизировать ток и напряжение. Кроме того, микросхемы могут использоваться в качестве законченных функциональных блоков — операционных и линейных усилителей, мульти-вибраторов, логических элементов и др.

Диффузионные процессы служат для создания в полупроводниковом кристалле областей различных типов электропроводности легированием — введением различных примесей. Так, например, в чистый германий в процессе диффузии вводят необходимую легирующую примесь, доводя ее содержание до $10^{14} - 10^{19}$ атомов/см. При этом сопротивление кристалла германия снижается в сотни тысяч — миллионы раз по сравнению с сопротивлением исходного материала, а на границе раздела между областями различных типов электропроводности образуется электронно-дырочный переход.

Диффузионный процесс длителен по времени и не обеспечивает однородного распределения примеси.

При эпитаксии слой требуемого вещества наращивают на полупроводниковую пластину возгонкой в вакууме (сублимацией) или вакуумным испарением, одновременно легируя его. Осажденный эпитаксиальный слой точно воспроизводит кристаллическую решетку полупроводника и имеет меньше дефектов и дислокаций. Процесс эпитаксии менее длителен, чем процесс диффузии, а его воспроизводимость по распределению примеси, удельному сопротивлению и толщине наращиваемого слоя также значительно лучше. Полупроводниковые приборы и микросхемы, изготавливаемые по эпитаксиальной технологии, обладают высокими параметрами.

Для точного дозированного введения примесей как по площади, так и по глубине полупроводниковой пластины используют ионную имплан-

тацию, при которой легирующее вещество в виде ионов внедряется в исходный полупроводник с заданной скоростью. Этот метод позволяет имплантировать вещества, которые другими способами ввести в полупроводник невозможно.

Кроме того, в микроэлектронике для сплавления и сварки применяют электронно-лучевую обработку, а для герметизации — микроплазменную и лазерную.

Цикл изготовления полупроводниковых приборов и микросхем трудоемок и длителен. Следует иметь в виду, что не из каждого полупроводникового кристалла получают годное изделие. Основными путями увеличения выхода годных изделий и повышения их качества является совершенствование технологических процессов, основанное на внедрении современного оборудования и новых материалов, автоматизированного контроля и управления на базе ЭВМ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

Измерение — это числовое сравнение измеряемой физической величины с ее значением, принятым за единицу. Измерение может быть непосредственным и косвенным. При непосредственном измерении измеряемую величину сравнивают с мерой, а при косвенном преобразуют ее в другую, более удобную. Так, при измерении температуры стеклянным термометром по делениям шкалы определяют высоту (длину) столбика жидкости, а с помощью термометра сопротивления по омметру — электрическое сопротивление.

Довольно часто пользуются нулевым методом, при котором уравнивают измеряемую и известную величины так, что их результат становится равным нулю. Прибор, применяемый при нулевом методе, ничего не измеряет, поэтому его называют нулевым.

Измерительные приборы являются средствами измерений и служат для выдачи информации в доступной для восприятия форме и бывают аналоговыми (показания представляют собой непрерывную функцию изменений измеряемой величины), цифровыми, показывающими, самопишущими и печатающими.

Унификация выходных и входных сигналов в новых измерительных приборах и средствах автоматики обеспечивает их взаимозаменяемость, позволяет сократить номенклатуру и широко использовать при управлении ЭВМ.

При измерениях всегда появляются искажения, или погрешности, т.е. отклонения результата измерения величины от ее истинного значения. Погрешность измерений может быть абсолютной и относительной. Абсолютная погрешность — это разность между полученным при измерении значением величины и ее истинным значением. Относительная погрешность — это отношение измеренного значения величины к ее истинному значению. Абсолютные погрешности обычно выражают в физических единицах, а относительные — в процентах.

Рассмотрим основные приборы, с которыми приходится работать операторам термических процессов: электро- и радиоизмерительные (амперметры, вольтметры, генераторы, осциллографы), термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления, приборы регулирования и измерения температуры, давления и расхода газов, а также контроля параметров производственной атмосферы.

§ 1. Электро- и радиоизмерительные приборы

Наиболее часто для измерения тока и напряжения используют амперметры и вольтметры — показывающие приборы со стрелочным или цифровым отсчетом, в которых результаты измерений оцениваются непосред-

венно. Приборы для измерения малых токов и напряжений в своем названии имеют приставки "микро" и "милли" (микроамперметр, милливольтметр), а больших — "кило" (киловольтметр).

Амперметры включают в электрическую цепь последовательно потребителям электроэнергии, поэтому их электрическое сопротивление должно быть незначительным по сравнению с полным сопротивлением измеряемой электрической цепи. Вольтметры включают параллельно потребителю электроэнергии, и чтобы не искажался режим работы электрической цепи, входное сопротивление их должно быть большим по сравнению с сопротивлением потребителя. Потребляемая амперметрами и вольтметрами мощность должна быть незначительной.

Токи и напряжения можно измерять в широком диапазоне частот. Измерения токов на высоких и сверхвысоких частотах довольно сложны, поэтому в этих диапазонах обычно измеряют напряжения.

Оборудование полупроводникового производства в основном оснащено амперметрами и вольтметрами соответственно для измерения постоянного тока и напряжения промышленной частоты. Рассмотрим эти приборы более подробно.

Как уже отмечалось, вольтметры и амперметры должны соответственно иметь большое и малое входное сопротивление, стабильную градуировку шкалы, а широкополосные обладать также требуемой точностью измерений и незначительной зависимостью показаний от частоты.

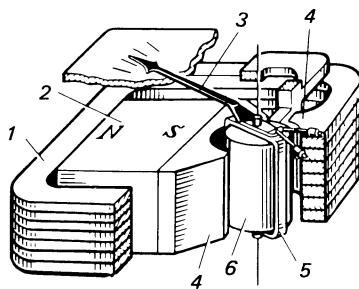
Известно несколько систем измерительных приборов (магнитоэлектрическая, электродинамическая, ферродинамическая, электромагнитная, электростатическая, термоэлектрическая и др.). Наиболее широко используются приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Дополнительные преобразователи переменного тока в постоянный позволяют использовать эти приборы для измерений в цепях переменного тока. Основными элементами приборов магнитоэлектрической системы являются постоянный магнит и катушка (рамка). Причем приборы этой системы выполняются с подвижной катушкой (магнит расположен внутри ее или снаружи — рис. 1) или с подвижным магнитом.

Прибор с подвижной катушкой 5 и внешним магнитом 2 имеет, кроме того, магнитопровод 1, полюсные наконечники 4 и цилиндрический сердечник 6, которые для создания равномерно и радиально направленных

Рис. 1. Измерительный прибор магнитоэлектрической системы с подвижной катушкой и внешним магнитом:

1 — магнитопровод, 2 — внешний магнит, 3 — стрелка, 4 — полюсные наконечники, 5 — подвижная катушка (рамка), 6 — цилиндрический сердечник



магнитных силовых линий в воздушных зазорах между сердечником и полюсными наконечниками изготовляют из магнитомягкого материала. Сердечник закреплен неподвижно. Относительно него может свободно поворачиваться подвижная катушка (рамка) 5, пересекая своими рабочими сторонами магнитные силовые линии под прямым углом. С подвижной рамкой жестко связана стрелка 3, которая при повороте рамки отклоняется. Спиральные пружинки, закрепленные на оси стрелки, создают противодействующий момент, возвращающий стрелку после окончания измерений в нулевое положение. Функции успокоителя стрелки выполняет алюминиевый каркас подвижной рамки, в котором при вращении рамки в магнитном поле возникают тормозящие вихревые токи.

При измерениях по подвижной катушке проходит электрический ток, взаимодействующий с магнитным полем постоянного магнита, в результате чего образуется вращающий момент, пропорциональный току и действующий на подвижную катушку. Под действием вращающего момента подвижная катушка поворачивается, закручивая спиральные пружинки. При равенстве моментов подвижной катушки и спиральных пружинки стрелка останавливается против соответствующего деления шкалы.

Приборы магнитоэлектрической системы имеют высокую чувствительность и точность, равномерную шкалу. Маркировка положительного и отрицательного полюсов служит для правильного включения приборов в электрическую цепь.

Для измерения токов, превышающих предельный ток прибора, применяют шунты, представляющие собой резисторы, включаемые параллельно прибору. Сопротивление шунта должно быть по возможности меньше внутреннего сопротивления амперметра, так как в этом случае меньший ток пройдет через прибор. Для измерения постоянного напряжения последовательно измерительному прибору включают добавочный резистор, сопротивление которого подбирают так, чтобы при предельном значении измеряемого напряжения стрелка прибора имела предельное отклонение.

Приборы электромагнитной системы являются универсальными, так как могут использоваться для измерений в цепях постоянного и переменного тока. Устройства двух электромагнитных систем с подвижным сердечником с плоской и круглой катушкой, а также с подвижным элементом во внешней магнитной цепи катушки показаны на рис. 2, а—в.

Рассмотрим устройство прибора электромагнитной системы с подвижным элементом во внешней магнитной цепи катушки (рис. 2, в). Внутри катушки 1 находится неподвижный сердечник 14, полюсные наконечники 15 и 17 которого выведены наружу. Между полюсными наконечниками расположен сектор 16, способный вращаться относительно оси, на конце которой расположены жидкостный успокоитель и стрелка 5.

При включенной в электрическую цепь катушке магнитный поток, проходя через полюсные наконечники 15, сектор 16 и полюсные наконечники 17, разномысленно намагничивает их и ближайшую к ним часть сектора 16. В результате подвижный сектор втягивается в зазор между полюсными наконечниками. Втягивающее усилие сердечника определяется взаимо-

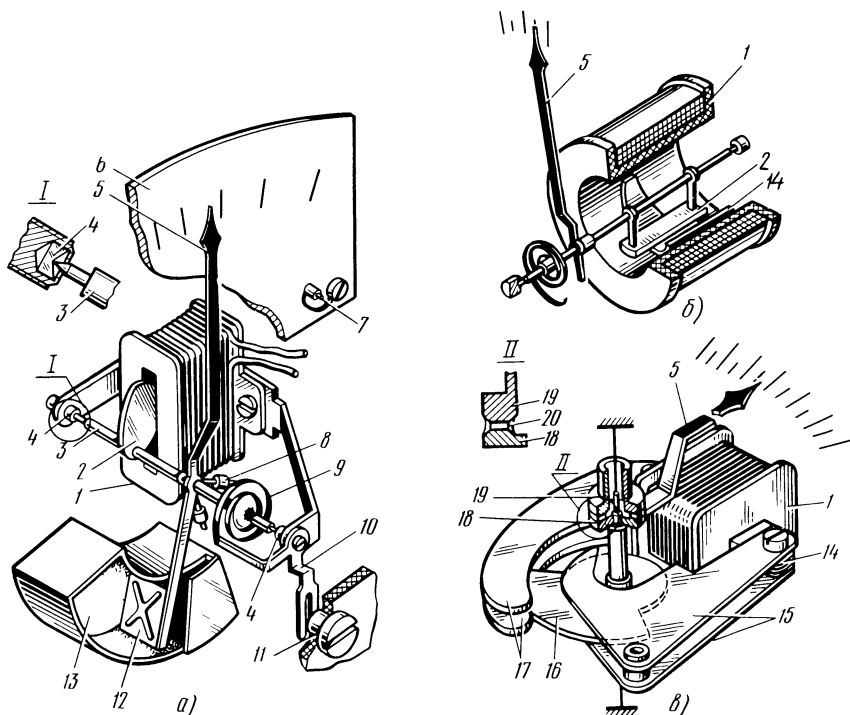


Рис. 2. Измерительные устройства приборов электромагнитной системы с подвижным сердечником и плоской (а) или круглой (б) катушками и с подвижным элементом во внешней магнитной цепи катушки (в) :

1 — катушка, 2, 14 — подвижный и неподвижный сердечники, 3 — ось, 4 — подпятник, 5 — стрелка, 6 — шкала, 7 — пружинящие упоры, 8 — противовесы, 9 — сигнальная пружина, 10 — поводок, 11 — винт с эксцентрично расположенным пальцем, 12 — крыло, 13 — камера, 15, 17 — полюсные наконечники, 16 — подвижный сектор, 18, 19 — подвижный и неподвижный диски, 20 — слой вязкой жидкости

действием двух магнитных полей — катушки и намагниченного сектора, каждое из которых пропорционально электрическому току в катушке. Поэтому перемещение стрелки по шкале прибора будет соответствовать измеряемым значениям тока или напряжения.

В приборах электромагнитной системы используются три типа успокоителей: воздушный (рис. 2, а), индукционный (рис. 2, б) и жидкостный (рис. 2, в). Наиболее совершенен успокоитель с невымывающейся кремний-органической жидкостью, состоящий из подвижного диска 18, укрепленного на оси сектора, и неподвижного диска 19. При повороте стрелки 5 поворачивается диск 18, движение которого сдерживается слоем вязкой жидкости 20.

Приборы электромагнитной системы характеризуются простотой конструкции, надежностью, устойчивостью к перегрузкам и имеют равномерную шкалу.

Генераторы — маломощные источники электрических колебаний различной частоты. Измерительные генераторы используются при испыта-

ниях, регулировках и проверках радиоэлектронной аппаратуры, а также измерении параметров полупроводниковых приборов и подразделяются по форме и частоте генерируемых сигналов. По форме генерируемых сигналов они бывают синусоидальные (гармоничные), импульсные, шумовые и специальные, а по частоте — низко-, высоко- и сверхвысокочастотные с коаксиальным или волноводным выходом. Измерительные генераторы обычно состоят из нескольких унифицированных блоков.

Основным блоком является задающий генератор, который служит для создания переменных напряжений требуемой формы и частоты. Наибольшее распространение получили задающие RC - и LC -генераторы. RC -генераторы просты, надежны, не имеют катушек индуктивности и генерируют напряжение синусоидальной формы, частоту которого можно перестраивать в широких пределах с помощью переменных резисторов или конденсаторов. В основном их применяют в генераторах сигналов низкой частоты. LC -генераторы, выполняемые по схемам с индуктивной, автотрансформаторной или емкостной положительной обратной связью, главным образом используются для получения сигналов высокой частоты.

Предварительный и выходной усилители измерительных генераторов предназначены для усиления мощности генерируемых сигналов и создания на выходе определенного их уровня, который контролируют по вольтметру выпрямительной системы.

Аттенуатор, или делитель напряжений (мощностей), подключаемый после выходного усилителя, уменьшает выходное напряжение в заданное число раз и позволяет получить весьма малые уровни сигналов для проверки высокочувствительной радиоэлектронной аппаратуры.

Выходные устройства (трансформаторы или схемы повторителей) служат для согласования внутреннего сопротивления измерительного генератора с выходным сопротивлением проверяемой аппаратуры. Блок питания измерительных генераторов состоит из выпрямителя, стабилизатора и фильтров и служит для подачи постоянного стабилизированного напряжения.

Рассмотрим принцип действия LC -генератора. Простейший полупроводниковый генератор незатухающих колебаний (рис. 3) состоит из источника питания, колебательного LC -контура, транзистора и катушки L_6 в цепи его базы, индуктивно связанной с катушкой L , а также резистора R_3 и конденсатора C_3 . При подаче питания на генератор проходящий ток в цепи коллектора транзистора заряжает конденсатор C , который разряжается на катушку L . При этом в контуре возникают свободные колебания, частота которых определяется его емкостью и индуктивностью.

Проходящий через катушку L переменный ток индуцирует в катушке L_6 переменное напряжение, управляющее током базы транзистора. Отрицательная полуволна напряжения на базе транзистора закрывает его, а положительная открывает. При открывании транзистора через него проходит коллекторный ток, который поступает на верхнюю обкладку конденсатора C . Если на этой обкладке в это время возрастает отрица-

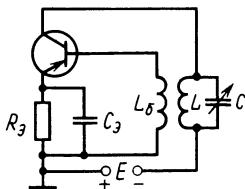


Рис. 3. Схема генератора незатухающих колебаний

тельный заряд, то коллекторный ток подзаряжает конденсатор C и компенсирует потери энергии в контуре. Описанный процесс повторяется до тех пор, пока не будет отключено питание генератора.

Для поддержания незатухающих колебаний необходимо, чтобы усиленное напряжение, создаваемое LC -контуром, совпадало по фазе с напряжением свободных колебаний. Кроме того, следует правильно подключать концы катушек L и L_6 и располагать их близко друг от друга.

Таким образом, LC -генератор преобразует энергию постоянного тока батареи E в энергию переменного тока. Это происходит потому, что часть энергии колебаний попадает из контура в цепь базы транзистора и управляет его коллекторным током, который возмещает потери энергии в контуре. В результате образуются незатухающие колебания, процесс поддержания которых называют с а м о в о з б у ж д е н и е м. Связь коллекторной цепи с базовой через катушки L_6 и L называют о б р а т н о й. В рассматриваемой схеме генератора обратная связь индуктивная. Кроме того, отрицательное напряжение на базе транзистора поддерживается автоматически вследствие падения тока на резисторе R_3 , включенном в цепь эмиттера. При отсутствии колебаний ток эмиттера очень мал и отрицательное напряжение близко к нулю. При возникновении колебаний появляется пульсирующий ток эмиттера, который создает падение напряжения на резисторе R_3 , являющееся запирающим напряжением базы. Конденсатор C_3 служит для сглаживания пульсаций, причем его емкостное сопротивление должно быть во много раз меньше, чем у резистора R_3 .

О с ц и л л о г р а ф ы — это универсальные измерительные приборы, используемые для определения мгновенных и амплитудных напряжений, токов, мощности, длительности импульсов, фазовых сдвигов, высокоточного сравнения частот, а также снятия вольт-амперных, частотных амплитудных и других характеристик полупроводниковых приборов. Осциллографы состоят из электронно-лучевой трубки с высоковольтным выпрямителем питающих напряжений, каналов вертикального и горизонтального отклонения луча и управления его яркостью, калибраторов длительности и амплитуды, а также блоков питания.

Рассмотрим устройство и принцип действия двухканального высокочувствительного осциллографа (рис. 4), предназначенного для исследования формы и измерения временных и амплитудных значений электрических сигналов на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ). Исследуемый сигнал подают на "Вход Y " и с помощью переключателя $B1$ и аттенюатора 2 (частотно-компенсационного делителя напряжения на 11 ступеней) выбирают значение сигнала, удобного для наблюдения на экране ЭЛТ. Далее сигнал подается на вход усилителя вертикального отклонения 3 с линией задержки. Назначением этого блока является усиление до необходимого значения поступившего сигнала и передача его на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ. Линия задержки в усилителе вертикального отклонения обеспечивает условия, необходимые для наблюдения и исследования переднего фронта коротких импульсов. По линии задержки исследуемый сигнал подается на вход схемы внутренней синхронизации 9, управляющей работой генератора развертки 7 для получения неподвижного изображения осциллограммы.

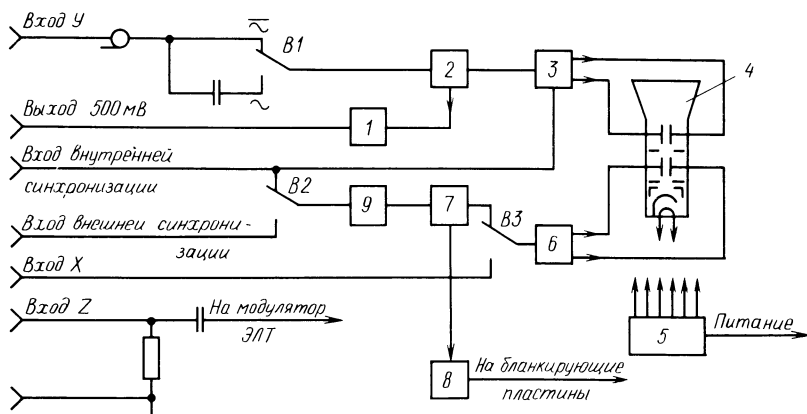


Рис. 4. Структурная схема осциллографа:
 1 — калибратор чувствительности, 2 — аттенюатор, 3, 6 — усилители вертикального и горизонтального отклонения, 4 — электронно-лучевая трубка, 5 — блок питания, 7 — генератор развертки, 8, 9 — схемы blankирующих импульсов и синхронизации

Для запуска генератора развертки может быть использован внешний сигнал, подаваемый при включении переключателя *B2* на вход схемы внешней синхронизации. Схемы синхронизации и развертки создают прямоугольные импульсы постоянной амплитуды независимо от значения и формы подаваемого на вход осциллографа сигнала. В результате в генераторе развертки вырабатывается устойчивое напряжение пилообразной формы, необходимое для горизонтальной развертки луча на экране ЭЛТ. Далее это пилообразное (отклоняющее) напряжение усиливается до необходимого значения, формируется в двухтактный сигнал, который умножается и подается на отклоняющие пластины ЭЛТ. При включении переключателя *B3* на оконечный усилитель горизонтального отклонения 6 через "Вход X" подается исследуемый сигнал. Для гашения электронного луча на экране ЭЛТ при обратном ходе пилообразного напряжения подают прямоугольные импульсы, которые создаются схемой blankирующих импульсов 8.

Калибратор чувствительности 1 служит для периодической проверки калибровки усилителя вертикального отклонения при изменении амплитуды исследуемых сигналов. Кроме того, он компенсирует выносной делитель калибровочными импульсами, подаваемыми на "Выход" осциллографа.

Конструкцией осциллографа предусмотрено получение яркостных меток времени при подаче внешнего сигнала на гнездо "Вход Z", которое через конденсатор связано с модулятором ЭЛТ.

Блок питания 5 служит для подачи стабилизированного напряжения при подключении осциллографа как к сети постоянного тока напряжением 24 В, так и переменного напряжением 220 В.

§ 2. Термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления

Термоэлектрические преобразователи ТП (термопары) широко применяют для измерения температуры от -200 до 2500°C . Принцип действия их основан на зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-эдс) от температуры. Термопара состоит из двух разнородных проводников, спаянные концы которых называют горячими или рабочими, а свободные — холодными (рис. 5, а—г).

При нагреве спаянных концов в цепи термопары появляется электрический ток. Объясняется это явление тем, что в различных металлах плотность свободных электронов неодинакова. Поэтому в месте соприкосновения разнородных металлов электроны в основном будут диффундировать из металла большей плотности в металл меньшей плотности и значительно слабее в обратную сторону. Образующееся в месте соединения двух металлов электрическое поле будет препятствовать этой диффузии. Когда скорость диффузионного перехода электронов сравняется со скоростью их обратного движения под влиянием установившегося электрического поля, наступит состояние подвижного равновесия. В этом состоянии между разнородными металлами возникает контактная разность потенциалов. Но так как плотность свободных электронов зависит также от температуры горячего спая, в месте соприкосновения разнородных проводников при любых температурах возникает термо-эдс, для измерения которой в цепь термопары включают измерительный прибор.

По материалу, из которого выполняют термопары, их разделяют: из благородных или неблагородных металлов и из тугоплавких соединений или их комбинаций с другими материалами. Кроме того, термопары бывают нестандартных и стандартных градуировок. Технические характеристики термопар стандартных градуировок приведены в табл. 1, а их градуировочные кривые — на рис. 6.

Платинородий-платиновая термопара ТПП, изготавливаемая из благородных металлов и широко применяемая в технике, характеризуется высокой воспроизводимостью градуировочной характеристики и стабильностью, предназначена для измерения температур до 1200 — 1300°C . При повышении верхнего предела измерения ее стабильность существенно снижается, а при длительной работе вследствие летучести родия из платинородиевого термоэлектрода уменьшается термо-эдс. Недостатками этой термопары являются небольшая чувствительность и высокая стоимость термоэлектродного материала.

Платинородий-платинородиевая термопара ТПР, также изготавливаемая из благородных металлов, предназначена для измерения температур от 1200 — 1600°C , при которых ее градуировочная характеристика стабильна. Из градуировочной кривой видно, что термо-эдс термопары при температурах до 200°C равна нулю. Поэтому отпадает необходимость в компенсации температуры ее свободных концов.

По остальным основным характеристикам термопары ТПП и ТПР аналогичны друг другу. Из-за высокой стоимости их термоэлектроды делают малых размеров (ϕ 0,5—0,6 мм). Используют эти термопары только

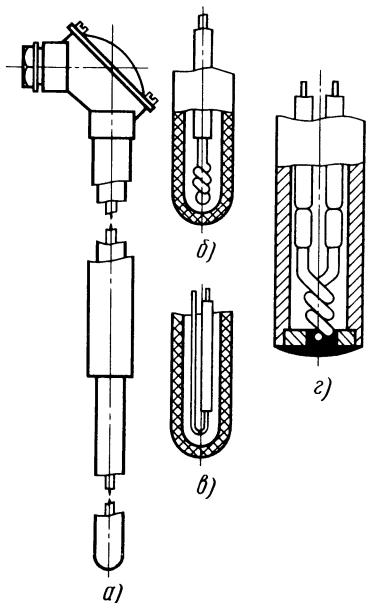
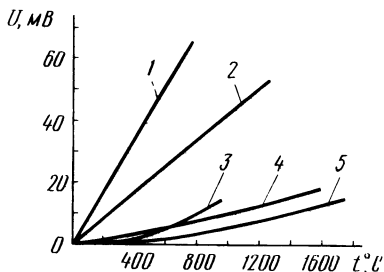


Рис. 5. Термопары:
а — общий вид, б, в, г — рабочие концы хромель-алюмелевой, платинородий-платиновой и малоинерционной

Рис. 6. Градуировочные кривые термопар:

1 — хромель-копелевой ХК, 2 — хромель-алюмелевой ХА, 3 — из сплавов НК-СА, 4 — платинородий-платиновой ПП, 5 — платинородий-платинородиевой ПР30/6



для измерения температур, превышающих 1000°C , так как при более низких температурах с успехом могут быть применены более дешевые.

Термопары хромель-алюмелевые ТХА, хромель-копелевые ТХК и из спецсплавов ТНС изготавливают из неблагородных металлов. Самыми распространенными являются термопары ТХА и ТХК, применяемые в различных отраслях промышленности.

Хромель-алюмелевые термопары, как правило, служат для измерения температур не выше $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ и редко до $1250\text{--}1300^{\circ}\text{C}$. При работе на воздухе стабильность этих термопар изменяется вследствие выгорания компонентов сплава. Кроме того, их стабильность зависит от продолжительности работы и диаметра термоэлектродов, которые выполняют по возможности толстыми (до 3,2 мм). На точность показаний влияет также длина погружаемой в печь части термопары. Термопары ТХА имеют линейную зависимость термо-эдс от температуры.

Хромель-копелевые термопары ТХК из-за невысокой жаростойкости копеля применяют для измерения температуры до 600°C , но чувствительность их в два раза выше, чем термопар ТХА.

Термопары ТНС отличаются от других особой формой градуировочной кривой, которая в интервале температур от 0 до 200°C близка к нулю. Поэтому изменение температуры холодных (свободных) концов термопары ТНС не влияет на ее термо-эдс. Это является достоинством данных термопар; их недостаток — низкая чувствительность. Термопары ТНС применяют для измерения температур до 1000°C . В интервале температур от 400 до 1000°C зависимость их термо-эдс от температуры линейна.

Вольфрам-рениевые термопары ТВР являются нестандартными, изготовляются из тугоплавких металлов и предназначены для измерения тем-

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики термопар стандартных градуировок

Термопара	Градуировка	Химический состав термоэлектродов		Верхний температурный предел применения, °С	Чувствительность, мВ/°С	Термометрическая погрешность, мВ	Рабочая среда
		положительного	отрицательного				
Платинородий-платиновая ТПП	S (ПП)	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платина (100% Pt)	1300	0,01	16,72	Окислительная, вакуум
Платинородий-платинородиевая ТПР	B (ПР)	Платинородий (70% Pt, 30% Rh)	Платинородий (94% Pt, 6% Rh)	1600	0,01	13,927	То же
Хромель-алюмелевая ТХА	K (ХА)	Хромель (89% Ni, 9,8% Cr, 1% Fe, 0,2% Mn)	Алюмель (94% Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1% Si, 0,5% Fe)	1000	0,04	52,41	"
Хромель-копелевая ТХК	ХК	То же	Копель (5% Cu, 45% Ni)	600	0,08	66,40	Окислительная, восстановительная, вакуум
Из сплавов ТНС	НС	Сплав НК	Сплав СА	1000	0,02	13,39	Окислительная, вакуум
Вольфрам-рениевая ТВР	ВР	Сплав вольфрама с рением (95% W, 5% Re)	Сплав вольфрама с рением (80% W, 20% Re)	2200	0,01—0,015	31,45	Восстановительная, нейтральная (инертная), вакуум

ператур до 2000—2500°С в восстановительной атмосфере или вакууме. В окислительной атмосфере эти термопары могут работать только временно (несколько десятков секунд).

При определении температур термоэлектрическими преобразователями погрешности измерений, вызываемые действием электрических и магнитных полей, незначительны, поэтому их обычно не учитывают. Погрешности из-за изменения температуры свободных (холодных) концов преобразователей довольно существенны и их следует учитывать. Это объясняется разницей между температурой градуировки, равной 0°С, и действительной температурой свободных концов. Измерив температуру, вносят, пользуясь специальной таблицей, поправку.

Термостатированием свободных концов преобразователя погрешности компенсируют. Термостатирование можно выполнять тремя способами: ледяной ванной, компенсационным мостом и термоэлектрическим термостатом. Наиболее удобен и отвечает современным требованиям способ термоэлектрического термостата, позволяющий измерять температуру с погрешностью $\pm (5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5})^\circ\text{C}$. При этом используют полупроводниковые микрохолодильники ТЛМ, обеспечивающие в режиме охлаждения перепад температур не менее 50°С, а в режиме нагрева — до +50°С. В качестве регистрирующего прибора применяют цифровой милливольтметр, измеряющий постоянное напряжение от 100 мкВ и выше (например, универсальный вольтметр В7-27 или другие аналогичные).

Термометры сопротивления широко применяют для измерения температур от -260 до +750°С. Принцип действия их основан на свойстве веществ изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Наибольшее распространение получили термометры сопротивления, чувствительный элемент которых изготовлен из чистых металлов (платины, меди, никеля). Реже используют приборы с чувствительным элементом из полупроводниковых материалов. Материал чувствительного элемента не должен окисляться и должен иметь высокую воспроизводимость значений электрического сопротивления в интервале рабочих температур и монотонную зависимость сопротивления от температуры.

В наибольшей степени указанным требованиям отвечает платина, которая устойчива в воздушной среде и длительное время сохраняет свои градуировочные характеристики до температуры 750°С. При более высокой температуре платина начинает расплываться. Недостатками платины являются высокая стоимость и нелинейная зависимость ее сопротивления от температуры.

Термометры сопротивления (рис. 7, а—в) представляют собой спираль или катушку из тонкой проволоки, намотанную на каркас 5 или 6 из изоляционного материала и представляющую собой чувствительный элемент 4, заключенный в защитную гильзу 1, от которой он хорошо изолирован. Гильза предохраняет чувствительный элемент от механических повреждений и воздействия окружающей среды.

Надежность термометров сопротивления во многом определяется механической прочностью конструкции, степенью герметичности гильзы и качеством изготовления чувствительного элемента. При значительной длине чувствительного элемента (несколько сантиметров) * термометр

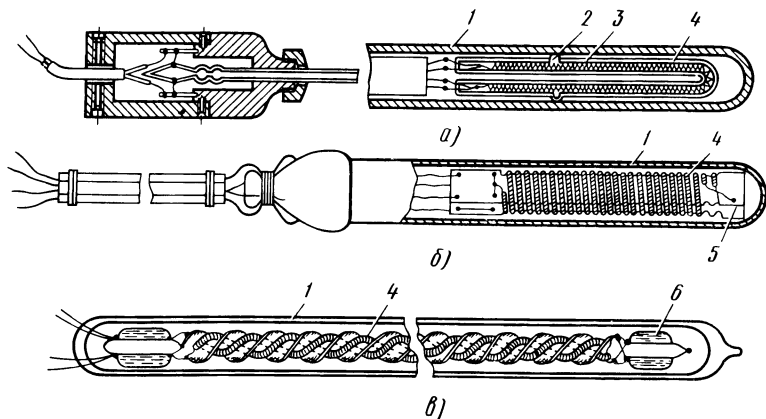


Рис. 7. Платиновые термометры сопротивления:
а — Барбера, *б* — Мейера, *в* — Стрелкова; 1 — защитная гильза, 2 — отверстие для удаления воздуха и заполнения гелием, 3 — изогнутая стеклянная трубка, 4 — платиновый чувствительный элемент, 5, 6 — крестообразный слюдяной и стеклянный каркасы

сопротивления, помещенный в среду с неравномерной температурой, измеряет некоторую среднюю температуру.

Достоинствами термометров сопротивления являются высокая точность измерения температуры и возможность выпуска измерительных приборов для них со стандартной градуировкой шкалы. Термометры сопротивления применяют в комплекте с логометрами, автоматическими уравновешенными мостами и автоматическими компенсационными приборами, шкалы которых отградуированы в градусах Цельсия. Градуировка прибора должна соответствовать градуировке термометра сопротивления.

§ 3. Приборы для измерения и регулирования температуры

В настоящее время используется довольно много различных автоматических терморегулирующих и измерительных приборов, среди которых в полупроводниковом производстве наиболее широко используются автоматические потенциометры и уравновешенные мосты.

Автоматические потенциометры применяются в термических установках для измерения, записи, сигнализации или регулирования температуры и работают в комплекте с термоэлектрическими преобразователями (термопарами). Для сигнализации и регулирования температуры автоматические потенциометры снабжаются дополнительными устройствами. По конструкции автоматические потенциометры бывают показывающие (КПП1, КВП1), а также показывающие и самопишущие с ленточной (КСП1, КСП2, КСП4) или дисковой (КСП3) диаграммой. Автоматические потенциометры с ленточной диаграммой служат для измерения и записи температуры как в одной, так и в нескольких (2, 3, 6 и 12) точках, а с дисковой — только в одной точке.

Многоточечные самопишущие приборы имеют каретку с печатающим

устройством (механизмом) для одно- или многоцветной записи и двух-полюсный переключатель, автоматически подключающий к измерительной схеме потенциометра все присоединенные термопары. Измеряемая температура записывается на ленточной диаграмме последовательно точками с цифрами соответственно каждой термопаре.

В одноточечных самопишущих приборах записывающее устройство (перо, шариковая ручка) регистрирует измеряемую температуру непрерывной линией на движущейся бумажной ленте.

Промышленностью выпускаются автоматические потенциометры высоких классов точности: 0,25; 0,5 и 1,0.

В полупроводниковом производстве широко применяют потенциометры с постоянным рабочим током, обладающие высокой точностью, так как измеренная термопарой термо-эдс сравнивается со стабильной известной эдс нормального элемента. Принцип действия автоматических потенциометров основан на компенсационном методе измерения.

В компенсационную цепь потенциометра с постоянным рабочим током (рис. 8) включены регулируемый резистор R , источник питания $ИП$, реохорд R_p со скользящим контактом $СК$ и контрольный резистор R_k , служащий для установления рабочего тока. Переключателем $П$ гальванометр $Г$ можно включать в цепь нормального элемента $НЭ$ или термопары $Т$. Чтобы установить определенный рабочий ток в компенсационной цепи, переключатель $П$ включают в цепь нормального элемента $НЭ$ и регулируют его резистором R до тех пор, пока падение напряжения на контрольном резисторе R_k не будет равно эдс нормального элемента. При этом указатель гальванометра устанавливается на нулевой отметке (в середине) шкалы.

Затем переключатель $П$ возвращают в среднее (нейтральное) положение, скользящий контакт $СК$ устанавливают в положение, примерно соответствующее значению измеряемой термо-эдс, включают переключатель $П$ в цепь термопары. Наблюдая за отклонением указателя нулевого прибора гальванометра, перемещают скользящий контакт $СК$ до тех пор, пока указатель не возвратится на нулевую отметку шкалы, т.е. пока компенсирующее напряжение на участке реохорда R_p между точками подключения гальванометра и скользящего контакта не будет равно измеряемой термопарой термо-эдс. Значение термо-эдс отсчитывают по шкале реохорда R_p напротив указателя скользящего контакта $СК$ в тот момент, когда гальванометр показывает отсутствие тока в цепи термопары.

Поэтому при измерении термо-эдс компенсационным методом в цепи термопары нет падения напряжения, а следовательно, и искажений значения измеряемой термо-эдс. Показания потенциометра при этом не зависят от изменения сопротивления соединительных проводов и термопары, что является их существенным преимуществом по сравнению с другими приборами для измерения температуры (например, с милливольтметрами). Но значительное увеличение сопротивления внешней цепи уменьшает точность уравнивания, что снижает чувствительность гальванометра.

Рассмотрим устройство автоматических одноточечных потенциометров КСП2 и КСП4 с ленточной диаграммой (рис. 9), измерительная схема которых получает питание 6,3 В от стабилизированного источника $ИПС$.

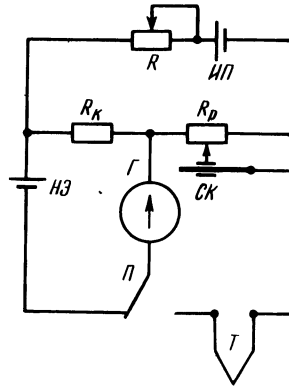


Рис. 8. Схема потенциометра с постоянным рабочим током

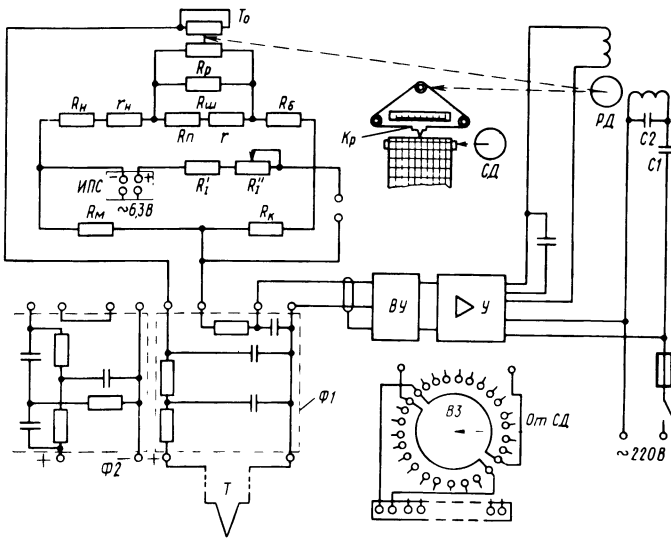


Рис. 9. Автоматический однотоочный потенциометр с ленточной диаграммой КСП4

Для уменьшения влияния помех на точность работы приборов их снабжают двойными Г-образными фильтрами $\Phi 1$ для указателей с временем прохождения всей шкалы 2,5 и 5 с двойными Т-образными фильтрами $\Phi 2$ для указателей с временем прохождения всей шкалы 1 с.

В приборах КСП2 и КСП4 применен линейный реохорд R_p , выполненный в виде отдельного модуля с заданным нормированным сопротивлением, что упрощает их ремонт, который состоит в простой замене изношенного реохорда новым. Для подгонки сопротивления реохорда R_p служит шунт $R_{ш}$. Функции контрольного выполняет резистор R_k сопротивлением $(509,5 \pm 0,2)$ Ом, ограничивающий рабочий ток в измерительной схеме при градуировке или поверке прибора. Резисторы $R_{п1}$ и $R_{п2}$ предназначены соответственно для установления диапазона измерений и начального значе-

ния шкалы прибора, а резистор R_6 — в качестве балластного для установления определенного рабочего тока верхней части измерительной схемы при различных градуировках.

Для автоматической компенсации изменения термо-эдс при измерении температуры холодных концов термопары T служит вспомогательный резистор R_M из медной проволоки. При использовании термопар градуировки ПР30/6 поправку на изменение температуры их холодных концов вводить не надо, поэтому все резисторы в автоматических потенциометрах, предназначенные для работы с указанными термопарами, изготавливают из манганиновой проволоки. Для ограничения и регулировки рабочего тока в цепи ИПС при градуировке или поверке прибора служат резисторы R'_1 и R''_1 .

Перемещение скользящего контакта реохорда R_p и каретки с указателем и пером осуществляется реверсивным асинхронным двигателем PD с конденсаторным пуском (фазовый сдвиг на 90° выполняют конденсаторы $C1$ и $C2$), а продвижение диаграммной ленты — синхронным электродвигателем CD (или $ДСМ$).

Движущим сигналом автоматических потенциометров является сигнал разбаланса между постоянным током (напряжением) измерительной схемы и термо-эдс термопары, преобразованный входным устройством $ВУ$ и усиленный полупроводниковым усилителем $У$ в виде напряжения переменного тока, приводящего в действие двигатель PD , который этот разбаланс устраняет.

В многоточечных автоматических потенциометрах в отличие от одноточечных для последовательного подключения нескольких термопар к измерительной схеме устанавливают переключатель $ВЗ$. Запись измеряемой температуры осуществляется циклично нанесением на диаграммную ленту точек с порядковым номером термопары в момент остановки каретки. Цифра, появляющаяся в окошке каретки, указывает номер термопары, сигнал которой будет отрабатываться в следующем цикле записи.

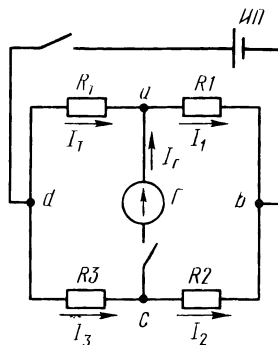
Рассмотренные автоматические потенциометры применяются в больших АСУТП, где кроме традиционных функций измерения и регистрации они служат для преобразования сигналов в форму, удобную для связи с любыми другими средствами автоматизации (электрическими, пневматическими) и управления, а также с вычислительными комплексами.

Более современные приборы А501, А502, А511 и А542 отличаются малыми габаритами, многоканальностью, унификацией, широким применением элементов микроэлектроники и работают с блоками нормализации, измерительными преобразователями, устройствами непрерывной сигнализации.

Автоматические уравновешенные мосты широко применяются в технике для измерения, записи, сигнализации и регулирования температуры в комплекте с термометрами сопротивления. Схема уравновешенного четырехплечего моста (рис. 10) состоит из термометра сопротивления R_T , включенного в одно из его плеч, и резисторов $R1$, $R2$ и $R3$, сопротивления которых известны, а также источника питания $ИП$ и чувствительного гальванометра G .

Резистор $R1$ выполняет функции сравнительного регулируемого плеча,

Рис. 10. Схема уравновешенного четырехплечего моста



изменяя сопротивление которого можно добиться такого состояния схемы, при котором потенциалы точек a и c , а следовательно, и ток I_r гальванометра Γ будут равны нулю, т.е. схема будет находиться в равновесии. Такое состояние моста может быть только при определенном соотношении между сопротивлениями его плеч. В уравновешенном мосте ток I_T его плеча ad будет равен току I_1 плеча ab , а ток I_3 плеча cd — току I_2 плеча cb .

В этом случае падения напряжений на резисторах R_T и R_3 , а также на резисторах R_1 и R_2 будут равны, т.е. $I_T R_T = I_3 R_3$; $I_1 R_1 = I_2 R_2$. После математических преобразований получим уравнение $R_T = I_3 R_1 / R_2$, из которого видно, что при постоянном отношении R_3 / R_2 уравновесить мост можно изменением сопротивления резистора R_1 . Подбранное сопротивление резистора R_1 будет сопротивлением всего плеча моста, складывающимся из сопротивления термометра, подключенного для измерения, и сопротивлений цепи плеча ad . Поэтому при изменении сопротивления термометра следует учитывать сопротивление цепи, которое может внести значительную погрешность.

Автоматические мосты, в которых уравновешивание четырехплечего моста осуществляется реохордом R_p (см. рис. 8), выпускаются классов точности 0,25; 0,5; 1,0; 1,5. В схеме, показанной на рис. 10, компенсация дополнительных погрешностей, вызванных изменением температуры окружающего воздуха, осуществляется трехпроводным включением термометра сопротивления.

Автоматический уравновешенный мост работает следующим образом. При нарушении равновесия моста, вызванного изменением сопротивления термометра R_T , на вход усилителя подается напряжение разбаланса (точки a и b). Усиленный сигнал приводит в действие реверсивный двигатель $РД$, вал которого кинематически связан с движком реохорда R_p и передвигает движок до тех пор, пока разбаланс не станет равным нулю. В этот момент двигатель отключается, а движок реохорда с указателем занимает положение, соответствующее измеряемому сопротивлению термометра.

Показывающие самопишущие и показывающие приборы имеют одинаковые схемы, но вторые без самопишущего устройства. Включение каретки самопишущего устройства и перемотка диаграммной ленты электродвигателем $СД$ происходят одновременно с перемещением движка реохорда.

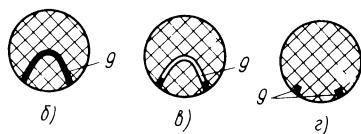
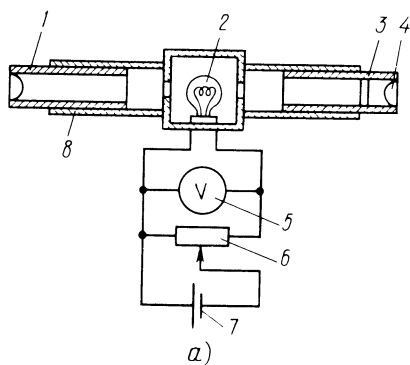


Рис. 11. Схема оптического пирометра (а) и яркости его нити при температурах ниже и выше температуры нагретого тела (б, в) и равной ей (г) :

1 — объектив, 2 — фотометрическая лампа, 3 — светофильтр, 4 — окуляр, 5 — измерительный прибор, 6 — переменный резистор, 7 — источник питания, 8 — корпус, 9 — нить

Внешнее оформление, исполнительные механизмы, сигнальные, регулирующие и другие устройства уравновешенных мостов такие же, как у автоматических потенциометров. Эти приборы могут быть также малогабаритного и миниатюрного исполнения.

Оптические пирометры используют в тех случаях, когда нельзя применить термопару. Принцип действия их основан на сравнении яркости раскаленного тела с яркостью нити накала специальной фотометрической лампы. Оптический пирометр ОППР (рис. 11, а) имеет шкалу с двумя пределами измерения ($800-1400^{\circ}\text{C}$ и $1200-2000^{\circ}\text{C}$) и состоит из объектива 1, фотометрической лампы 2, окуляра 4 со светофильтром 3, измерительного прибора 5, переменного резистора 6, источника питания 7 и корпуса 8. Так как предельная рабочая температура нити накала лампы лишь 1400°C , при переходе к верхнему пределу измерения пользуются светофильтром, ослабляющим яркость.

При измерениях объектив пирометра направляют на нагретое тело так, чтобы одновременно видеть его и нить накала фотометрической лампы. Изменяя сопротивление резистора R_6 , доводят яркость нити до яркости наблюдаемого объекта: их совпадение воспринимается глазом как исчезновение нити на фоне светящегося тела (рис. 11, б-г). В этот момент температуры нити и объекта измерений будут одинаковы. Найденную температуру отсчитывают по шкале измерительного прибора (вольтметра), градуированной в градусах.

Точность оптического пирометрирования в некоторой степени зависит от стабильности источника питания нити фотометрической лампы. При работе оптическая ось прибора должна быть расположена горизонтально, а шкала — вертикально.

§ 4. Приборы для измерения давления и расхода

Для измерения давления газов широко применяют U-образные манометры (напоромеры), манометры других типов, вакуумметры и другие приборы.

Напоромеры (рис. 12), обычно используемые для измерения давления воздуха выше атмосферного, неагрессивных газов до 0,1 МПа и вакуума

до 0,101 МПа, представляют собой открытую с двух сторон стеклянную трубку, изогнутую по форме буквы U, до половины заполненную рабочей жидкостью, уровни которой можно отсчитывать по специальной шкале. Измеряемое давление (разрежение или разность давлений) уравнивается и определяется столбом h рабочей жидкости, представляющим собой сумму столбов h_1 и h_2 в обоих коленах трубки. Для измерения давления выше атмосферного правое колено трубки соединяют с газовой средой объекта, а левое — оставляют открытым, сообщаясь с атмосферой. Давление ниже атмосферного измеряют, подключая колена трубки наоборот, т.е. левое соединяют с газовой средой объекта, а правое оставляют открытым. Разность давлений измеряют, подключая правое колено к большему давлению, а левое — к меньшему.

Рабочей жидкостью U-образных манометров может быть вода (внутренний диаметр трубки при этом должен быть не менее 8–10 мм, так как иначе нельзя точно определить уровень жидкости), спирт, ртуть. Обычно измеренное такими приборами давление выражают в миллиметрах столба рабочей жидкости, а для перевода в паскали пользуются следующей формулой: $p = hg(\rho - \rho_c)$, где g — ускорение свободного падения, м/с²; h — разность уровней, м, и ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м³; ρ_c — плотность среды над рабочей жидкостью, кг/м³.

Точность измерения давления U-образным манометром при строго вертикальной его установке составляет ± 2 мм столба рабочей жидкости.

Манометры, мановакуумметры, вакуумметры — приборы с упругими чувствительными элементами (сильфонами и одновитковыми трубчатыми пружинами) имеют одинаковое устройство.

Технические манометры, мановакуумметры, вакуумметры выпускаются классов точности 1; 1,5; 2,5 и 4 и могут иметь трубчатые пружины эллиптического и плоскоовального сечения или с эксцентриковым каналом. Тонкостенные пружины эллиптического сечения (пружины Бурдона) имеют приборы для измерения как низкого (до 0,1 МПа), так и высокого (до 6 МПа) давления, толстостенные пружины овального сечения — приборы для измерения высокого давления (до 20–160 МПа), а пружины с эксцентриковым каналом — приборы для измерения сверхвысоких давлений (1000 МПа и выше).

Рассмотрим показывающий манометр с одновитковой трубчатой пружиной Бурдона (рис. 13). Один конец этой пружины 5 закреплен к корпусу прибора держателем 7, имеющим штуцер 8 с шестигранником под ключ и резьбу для ввертывания в магистраль, в которой необходимо измерить давление. Другой свободный конец трубчатой пружины, закрытый пробкой с серьгой и герметично запаянный, соединен поводком 6 с сектором 4, который своим зубчатым венцом находится в зацеплении с маленькой шестеренкой (трибом) 2. На оси триба 2 закреплена стрелка 1. Спиральная пружина 3 прижимает зубья триба к зубьям сектора и выводит эту систему из крайних положений.

Манометр работает следующим образом. Под действием измеряемого давления трубчатая пружина деформируется, увеличиваясь в поперечном сечении, и тянет за собой поводок, поворачивающий зубчатый сектор, триб и стрелку, которая показывает на шкале значение давления. Так как

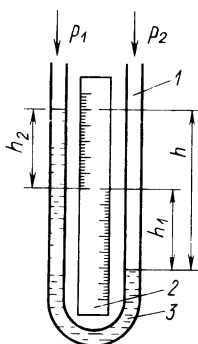


Рис. 12. U-образный манометр:

1 — стеклянная трубка, 2 — шкала, 3 — рабочая жидкость

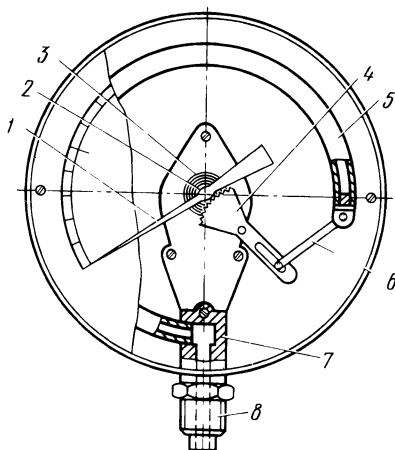


Рис. 13. Пружинный манометр:

1 — стрелка, 2 — триб, 3, 5 — спиральная и трубчатая пружины, 4 — сектор, 6 — поводок, 7 — держатель, 8 — штуцер

перемещение свободного конца трубчатой пружины и угол поворота стрелки пропорциональны измеряемому давлению, шкалы подобных приборов равномерны. Ход стрелки регулируют изменением длины плеча сектора со стороны поводка.

При измерении манометром давления ниже атмосферного трубчатая пружина скручивается и ее свободный конец перемещается не вверх, как при измерении высокого давления, а вниз. Следовательно, стрелка будет двигаться справа налево и прибор будет работать как вакуумметр. Если необходимо, можно изменить движение стрелки, установив трубчатую пружину с правой стороны.

Мановакуумметры отличаются от рассмотренных приборов наличием двусторонней шкалы: слева от нуля измеряют давление от 0,1 до 0 МПа, а справа — от 0,06 до 2,4 МПа.

При выборе прибора с одновитковой трубчатой пружиной необходимо, чтобы рабочий предел измерения был не менее 3/4 шкалы при измерении постоянного и переменного давлений.

Электроконтактные манометры, применяемые в автоматических системах и схемах сигнализации, отличаются от обычных приборов тем, что имеют специальные передвижные электрические контакты. Эти контакты можно установить на любые отметки рабочей шкалы манометра (мановакуумметра или вакуумметра), задав тем самым диапазон требуемых давлений. При снижении измеряемого давления до минимального значения, на которое установлен контакт, стрелка прибора замыкает его и включает сигнальную лампу или размыкает цепь автоматического управления. При увеличении давления до верхнего предельного значения стрелка прибора замыкает другой контакт; при этом включается другая сигнальная лампа или размыкается цепь автоматического управления.

Разновидностью манометров являются реле давления — приборы, не имеющие шкалы. Интервал рабочего давления устанавливают регулировкой контактов реле. Реле давления используют в системе охлаждения некоторых диффузионных термических установок. При снижении давления охлаждающей воды ниже минимального значения, обеспечивающего безаварийную работу установки, контакты реле замыкаются и автоматически отключают питание нагревателя.

Тепловые вакуумметры косвенного действия (например, термопарные и ионизационные электронные) наиболее широко используют в вакуумных системах при производстве полупроводниковых приборов и микросхем. Принцип действия термопарных вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газа от давления.

Термопарный манометрический преобразователь ПМТ (рис. 14) предназначен для измерения давлений от $2 \cdot 10^1$ до 10^{-1} Па и состоит из стеклянной трубки 1, заполненной газопоглотителем, которой он присоединяется к вакуумной системе, стеклянного баллона 2 и цоколя 5 с четырьмя штырьками 6. Внутри баллона расположены находящиеся в тепловом контакте платиновый подогреватель 3 и хромель-копелевая термопара 4. Преобразователь имеет два ввода подогревателя и два ввода термопары. Подогреватель питается от измерительного блока вакуумметра постоянным током.

При постоянном токе накала подогревателя термопарного преобразователя, вакуумно-плотно соединенного с откачиваемым объемом, термо-эдс термопары будет определяться давлением окружающего газа, так как изменение температуры подогревателя зависит от теплопроводности окружающего газа. При понижении давления теплопроводность газа уменьшается, температура подогревателя увеличивается, а следовательно, увеличивается и термо-эдс термопарного преобразователя. Таким образом, измеряемой величиной, по которой судят о давлении, является термо-эдс преобразователя. Зависимость термо-эдс от давления находят по градуировочной кривой, прилагаемой к термопарному манометрическому преобразователю.

Термопарные манометрические преобразователи ПМТ-2 имеют стеклянный баллон, а ПМТ-4М — металлический и могут работать в двух режимах: постоянного рабочего тока и постоянной термо-эдс. В режиме постоянного рабочего тока они измеряют давление до $5 \cdot 10^1$ Па. При давлении выше $5 \cdot 10^1$ Па режим постоянного рабочего тока заменяют режимом постоянной термо-эдс, при котором мерой давления газа является ток нагревателя. Это позволяет расширить диапазон измеряемых давлений до $6,7 \cdot 10^2$ Па.

Термопарный вакуумметр ВТ-3 состоит из ПМТ, блоков питания, а также измерения термо-эдс и тока нагревателя.

В блок питания входят силовой трансформатор, выпрямитель и компенсационный полупроводниковый стабилизатор напряжения. От двухполупериодной схемы выпрямителя питаются регулирующий элемент (транзистор) и усилитель компенсационного стабилизатора, для которого дополнительным источником питания является однополупериодная схема. Компенсационный стабилизатор состоит из регулирующего элемента и двухкаскадного усилителя постоянного тока. В качестве опорного элемента служит стабилитрон. Нестабильность напряжения блока питания не более $\pm 0,01\%$

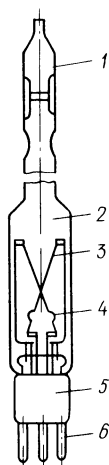


Рис. 14. Термопарный манометрический преобразователь:

1, 2 — стеклянные трубка и баллон, 3 — платиновый подогреватель, 4 — хромель-копелевая термопара, 5 — цоколь, 6 — штырьки

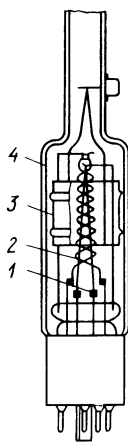


Рис. 15. Ионизационный манометрический преобразователь:

1 — катод, 2 — сетка, 3 — анод, 4 — стеклянный баллон

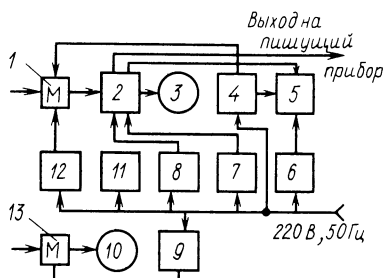


Рис. 16. Структурная схема ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-3: 1, 13 — ионизационный и термопарный манометрические преобразователи, 2 — усилитель постоянного тока, 3, 10 — стрелочные индикатор и прибор, 4 — стабилизатор, 5 — схема сигнализации и защиты катода, 6—9, 11, 12 — источники питания устройств вакуумметра стабилизированным напряжением

при токе нагревателя от 80 до 500 мА и не более $\pm 0,05\%$ при токе от 500 до 1000 мА; пульсации напряжения не превышают 30 мВ.

В вакуумметре ВТ-3 измерение термо-эдс и тока нагревателя выполняется одним прибором М-136/А (при измерении тока нагревателя к цепи измерительного прибора подключают добавочный резистор и шунт).

Электронные ионизационные вакуумметры, применяемые для измерения давлений от $1,3 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-1} Па, состоят из датчика — электронного ионизационного манометрического преобразователя (ПМИ) и измерительного электрического блока ВИТ-1, ВИТ-2 или ВИТ-3, верхний предел измеряемых давлений которых ограничен перегоранием накаливаемого катода и нарушением линейности характеристики преобразователя, а нижний — фоновым током, соответствующим давлению $5 \cdot 10^{-6}$ — $8 \cdot 10^{-6}$ Па. Принцип действия ионизационных вакуумметров основан на движении заряженных частиц в вакууме.

Ионизационный манометрический преобразователь (рис. 15) представляет собой электровакуумный прибор — триод, в стеклянный баллон 4 которого заключены катод 1, сетка 2 и анод 3. На анод подается отрицательный по отношению к катоду потенциал, равный 25 В, а на сетку — положительный, равный 200 В. Когда ионизационный преобразователь вакуумно-плотно соединен с откачиваемым объемом и подано питание, электроны с раскаленного катода 1, ускоренные положительным потенциалом

сетки 2, ионизируют находящийся в баллоне 4 разреженный газ, в котором возникает ионный ток, пропорциональный давлению газа в баллоне. Образующиеся при ионизации разреженного газа ионы собираются на аноде 3, находящемся под отрицательным потенциалом относительно катода. Ионный ток с анода подается на усилитель, а затем регистрируется измерительным прибором. Так как чувствительность ионизационного преобразователя обычно указана в паспорте, измерительный прибор вакуумметра градуируют непосредственно в единицах давления.

Ионизационно-термопарный вакуумметр ВИТ-3 (рис. 16), представляющий собой комбинированный переносный настольный прибор, служащий для измерения давления воздуха от 10^2 до 10^{-5} Па, работает совместно с ионизационным манометрическим преобразователем ПМИ-2 и термопарным манометрическим преобразователем ПМТ-2 или ПМТ-4М. Ионизационная часть вакуумметра предназначена для измерения ионного тока преобразователя, его питания, прогрева анода и измерения давления от 10^{-1} до 10^{-5} Па при работе с ионизационным манометрическим преобразователем ПМИ-2. Термопарная часть вакуумметра служит для питания преобразователя, измерения его термо-эдс и давления от 10^2 до 10^{-1} Па.

Как уже отмечалось, ионный ток ионизационного манометрического преобразователя служит мерой давления при неизменяющемся токе эмиссии электронов, ускоряющем анодном токе эмиссии электронов и ускоряющем анодном напряжении. При работе прибора ионный ток ионизационного манометрического преобразователя 1 подается через входные резисторы на усилитель постоянного тока 2, а затем регистрируется стрелочным прибором 3. Постоянство тока эмиссии поддерживается стабилизатором 4.

При неизменном токе накала термопарного манометрического преобразователя 13 его термо-эдс, как указывалось ранее, определяемая давлением газа в измеряемом объеме, преобразуется и регистрируется стрелочным прибором 10.

Схема 5 сигнализации и защиты катода предназначена для автоматического предохранения катода ионизационного манометрического преобразователя МИ-10-2 от перегорания при давлениях выше 10^2 Па. Для питания элементов электрической схемы вакуумметра служат стабилизированные источники 6—9, 11 и 12.

Ротаметры (их называют также расходомерами обтекания) используются для измерения расхода газов и жидкостей при постоянном перепаде давлений. Принцип действия этих приборов основан на изменении вертикального перемещения чувствительного элемента (поплавок, поршня) под действием потока газа или жидкости в стеклянной трубке переменного сечения. Ротаметры выпускаются классов точности 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

В полупроводниковом производстве наиболее часто применяют простейшие ротаметры с конусной стеклянной трубкой, внутри которой находится поплавок, снабженный для устойчивой работы наклонными каналами (рис. 17, а—в). Под действием потока жидкости или газа поплавок 2 перемещается вертикально и одновременно вращается относительно собственной оси, центрируясь в середине потока. По перемещению поплавка вдоль шкалы 1, нанесенной на конусную стеклянную трубку 3, судят об объемном расходе газа или жидкости в единицу времени ($\text{м}^3/\text{ч}$ или $\text{л}/\text{ч}$). Наруж-

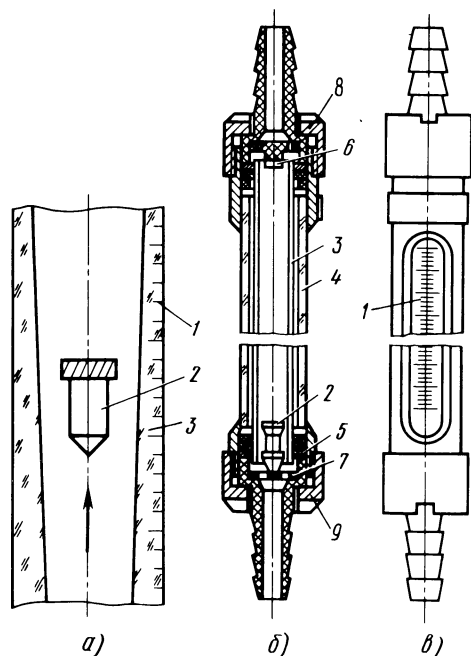


Рис. 17. Ротаметр:

а — принцип действия, *б* — устройство, *в* — общий вид; 1 — шкала, 2 — поплавок, 3, 4 — стеклянные трубки с конусным отверстием и наружная, 5 — прокладка, 6 — ограничитель хода, 7 — седло, 8, 9 — металлическая арматура

ная стеклянная трубка 4 ротаметра сверху и снизу заключена в металлическую арматуру 8 и 9. В нижней арматуре имеется седло 7, в которое поплавок опускается при нулевом расходе газа или жидкости, а в верхней — ограничитель 6 хода поплавка при максимальном расходе.

Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяют при измерении расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под давлением не более 0,6 МПа.

Электронные регуляторы расхода газа, имеющие датчики, преобразующие расход газа в электрический сигнал (напряжение постоянного тока), являются автоматическими приборами. Принцип действия датчика основан на компенсационном методе измерения с использованием мостовой схемы, имеющей два плеча, в которые включены терморезисторы (катушки из медной проволоки), пропускающие газ.

При отсутствии расхода газа мост сбалансирован и сигнал на выходе усилителя равен нулю. При поступлении газа первый терморезистор охлаждается им, отдавая теплоту, а второй охлаждается уже в меньшей степени, чем первый. Изменение температуры терморезисторов вызывает изменение их сопротивления и разбаланс мостовой схемы. Напряжение на выходе

усилителя изменяется, преобразуется и подается в электрическую схему управляющего устройства. Выходной сигнал при этом пропорционален расходу газа.

Для измерения и регулирования расхода газа датчик включают в электрическую схему, состоящую из первичного и передающего преобразователей цифрового универсального источника питания (ЦУИП), управляющего устройства и осциллографа (для контроля и настройки системы).

§ 5. Приборы для измерения параметров атмосферы производственных помещений

Рабочая атмосфера (окружающая среда) производственных помещений характеризуется тремя основными параметрами: влажностью, запыленностью и температурой.

Влажность. Различают относительную и абсолютную влажность. Относительная влажность — это отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к массе влажного вещества. Абсолютная влажность — это отношение массы влаги, содержащейся в веществе, к массе абсолютно сухого вещества. Измеряют влажность психрометрическими и сорбционными методами с помощью соответствующих приборов.

Психрометрический метод измерения влажности основан на сравнении температур воздуха и тела, с поверхности которого испаряется вода. На этом методе основан и принцип действия психрометра, представляющего собой устройство из двух одинаковых термометров, резервуар одного из которых обернут влажной батиновой повязкой, смачиваемой дистиллированной водой. Показания температуры "сухого" и "влажного" термометров различны. Чем суше окружающий воздух, тем интенсивнее происходит испарение воды и больше разница показаний термометров. На их показания существенно влияют также скорость обтекания влажного воздуха и атмосферное давление.

Относительную влажность воздуха определяют по формуле

$$\varphi = \frac{E_{t_B}^{\circ}}{E_{t_C}^{\circ}} - A \frac{H(t_C^{\circ} - t_B^{\circ})}{E_{t_C}^{\circ}},$$

где $E_{t_B}^{\circ}$ и $E_{t_C}^{\circ}$ — максимальные упругости паров воздуха соответственно при температурах "влажного" t_B° и "сухого" t_C° термометров; H — атмосферное давление; A — психрометрическая постоянная, учитывающая скорость движения влажного воздуха (например, при скорости 0,5 — 1 м/с влажного воздуха $A = 49,47$). Величины $E_{t_B}^{\circ}$, $E_{t_C}^{\circ}$ и H выражают в миллибарах (1 мбар = 10^2 Па), а значения их определяют по специальным таблицам.

Сорбционный метод измерения влажности основан на способности гигроскопических тел изменять свои свойства в зависимости от количества поглощенной влаги и положен в основу действия гигрометров, которые бывают волосяными и пленочными.

В волосяном гигрометре (рис. 18, а) датчиком влажности служит один человеческий волос, их пучок или волосная гитара. Рассмотрим принцип действия простейшего гигрометра с одним волосом 2, который постоянно

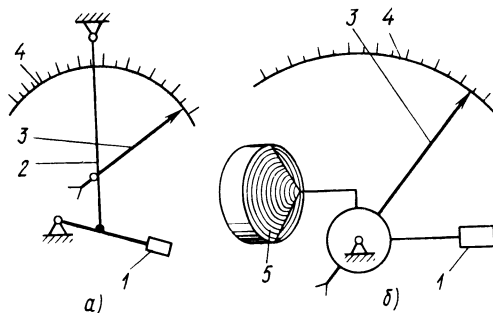


Рис. 18. Гигрометры:
а — волосной, *б* — проволочный; 1 — груз, 2 — волос, 3 — стрелка, 4 — неравномерная шкала, 5 — пленочная мембрана

натянут грузом 1. В зависимости от степени влажности длина волоса увеличивается или уменьшается. Это изменение передается стрелке 3, которая, перемещаясь по неравномерной шкале 4, указывает влажность.

В пленочном гигрометре (рис. 18, б) роль датчика выполняет мембрана из пленки 2, которая так же, как волос, реагирует на изменение влажности воздуха, уменьшая или увеличивая длину своего прогиба.

Гигрограф является специальным прибором, служащим для непрерывной регистрации влажности на специальной бумажной диаграмме. Кроме того, контролировать и регулировать влажность можно автоматическими устройствами с использованием в их схемах магнитоэлектрических логометров.

Запыленность. Анализатор запыленности АЗ-5 (рис. 19) предназначен для определения запыленности воздуха, технологических газов, эффективности работы газовых фильтров и концентрации аэрозолей и состоит из оптического датчика и электрического блока. Принцип действия его основан на рассеивании света измеряемыми аэрозольными частицами. Между размерами частиц и интенсивностью рассеянного света существует количественная зависимость. Анализатор запыленности предназначен для измерения концентрации частиц пыли от 1 до 300 000 в 1 л воздуха с фиксированием их размеров от 0,4 до 1 мкм через 0,1 мкм. Прибор имеет каналы дозированного измерения концентрации от 1 до 250 частиц пыли в 1 л воздуха за 50 с и непрерывного измерения концентрации от 250 до 300 000 частиц пыли в 1 л.

Анализируемый воздух засасывается через сопло 3 в измерительную камеру датчика с постоянным расходом и выходит через трубку 9. Перпендикулярно измерительной плоскости проходит сфокусированный пучок света, создаваемый источником 7 при прохождении через объективы 4, 6 и диафрагму 5. Часть этого пучка света, отразившись от частиц пыли в потоке воздуха под прямым углом, направлена к фотоэлектрическому усилителю (ФЭУ) через объектив 2 и диафрагму 1. Призмы 8 и 10 и модулятор светового потока 11 образуют устройство, служащее для контроля и калибровки размеров частиц пыли.

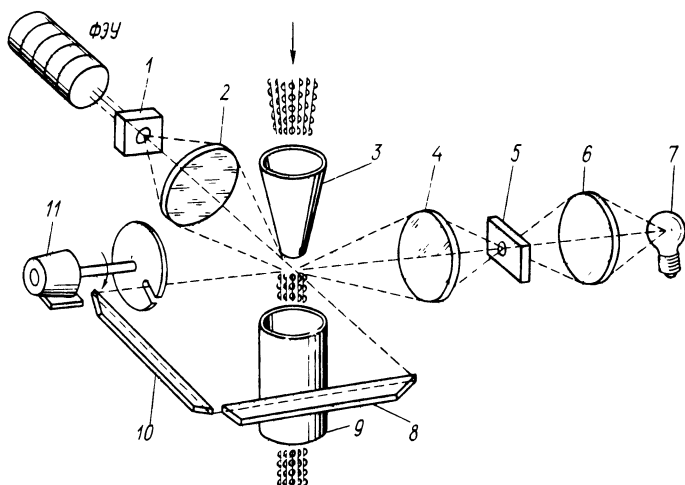


Рис. 19. Анализатор запыленности:

1, 5 — диафрагмы, 2, 4, 6 — объективы, 3 — сопло, 7 — источник света, 8, 10 — призмы, 9 — трубка вывода аэрозоля, 11 — модулятор светового потока

При попадании частиц пыли в измерительную камеру образуется рассеянный пучок света, вызывающий появление на выходе ФЭУ электрического сигнала, длительность которого равна времени пролета через камеру частицы пыли, а амплитуда характеризуется ее размером. Количество частиц пыли отсчитывается электромеханическим счетчиком или определяется по отклонению стрелки показывающего прибора. Если в воздухе, просасываемом через измерительную камеру, пыли нет, электрический сигнал ФЭУ отсутствует, а счетчик (или прибор) показывает ноль.

Температура. Для измерения температуры воздуха обычно используют жидкостные стеклянные термометры, принцип действия которых основан на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в стеклянную трубку. В зависимости от области применения термометра в качестве термометрической жидкости используют ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин. Ртуть используют в термометрах для измерения температуры от -35 до 750°C , этиловый спирт — от -80 до 70°C , а керосин от -60 до 300°C .

Наибольшее распространение получили ртутные термометры, так как ртуть не смачивает стекло и при нормальном атмосферном давлении остается жидкой в широком интервале температур. Недостатками ртути являются токсичность ее паров и сравнительно малый коэффициент температурного расширения (КТР ртути равен $18 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, а этилового спирта — $1,05 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

При измерении температуры пользуются двумя шкалами: Цельсия и Кельвина. В СИ единицей измерения температуры является градус Кельвина. По шкале Кельвина температура абсолютного нуля соответствует $-273,16^{\circ}\text{C}$. Между температурами по шкалам Кельвина (ТК) и Цельсия ($t^{\circ}\text{C}$) существует следующая зависимость: $\text{ТК} = t^{\circ}\text{C} + 273,16^{\circ}\text{C}$.

Кроме рассмотренных жидкостных стеклянных термометров расширения применяют и другие, например дилатометрические и биметаллические, действие которых основано на свойстве твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Эти термометры очень редко используют для измерения температуры. Обычно они служат чувствительными элементами в системах автоматического регулирования температуры. Биметаллические термометры применяют также в качестве термодатчиков в термографах — приборах, предназначенных для непрерывной автоматической регистрации температуры воздуха в производственных помещениях.

§ 6. Информационно-измерительные системы

Современные автоматические системы управления (АСУ), гибкие производственные системы (ГПС) и гибкие автоматизированные производства (ГАП) немыслимы без взаимодействия с информационно-измерительными системами (ИИС). Под информационно-измерительной системой понимают совокупность элементов, с помощью которых автоматически получают значения контролируемых параметров и сравнивают их с заданными. В полупроводниковом производстве информационно-измерительные системы предназначены для количественной оценки физико-химических свойств различных материалов, отклонений размеров получаемых из них деталей, а также выходных параметров готовых изделий.

Структурная схема простейшей информационно-измерительной системы показана на рис. 20. Преобразователь — чувствительный элемент *ЧЭ*, воспринимая изменения контролируемого параметра объекта исследования *ОИ*, вырабатывает пропорциональный этому изменению сигнал, который усиливается до необходимого уровня усилителем *У* и передается в измерительный блок *ИБ*, где сравнивается с заданным устройством *ЗУ* контролируемым параметром. В результате измерительный блок вырабатывает сигнал рассогласования, который воздействует на исполнительный орган системы автоматического контроля, управляющий ходом технологического процесса.

Автоматические системы контроля в зависимости от назначения предназначены для проверки изделий до обработки, в процессе обработки и после нее, а также для самонастраивающего активного контроля. Так, статические и динамические параметры всех изготавливаемых приборов измеряют в широком диапазоне с большой производительностью и точностью, используя универсальные средства измерения и контроля. Стандартная структура, применение микропроцессоров и ЭВМ, управляющих получением и обработкой результатов измерения и контроля, а также программ, с помощью которых происходит быстрая смена контролируемых параметров, обеспечивают универсальность информационно-измерительных систем.

Информационно-измерительная система обеспечивает по заданной программе полуавтоматическое или автоматическое контактирование выводов полупроводникового прибора с входными измерительными цепями, автоматическую коммутацию этих цепей, подачу необходимых

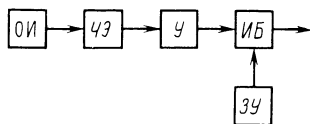


Рис. 20. Структурная схема информационно-измерительной системы

электрических сигналов, регистрацию результатов и сравнение их с эталонами, анализ и принятие по нему решения, индикацию и запись результатов измерения. Ввод программ работы системы, согласование выхода устройства программного управления с входом объекта управления, самоконтроль устройств системы и диагностика неисправностей осуществляются автоматически.

Производительность информационно-измерительных систем с одним контактирующим устройством, называемых однопостовыми, из-за низкого коэффициента использования измерительной части мала. Это объясняется тем, что время измерения, исчисляемое десятками долями секунды, значительно меньше времени контактирования, подсоединения прибора к контактному устройству и отключения от него, в течение которого измерительная часть простаивает. Чтобы ликвидировать эти простои, к измерительной части подключают несколько контактирующих устройств, которыми управляют микропроцессоры. Производительность таких информационно-измерительных систем, называемых многопостовыми, значительно выше.

Информационно-измерительные системы в комплекте с проходными камерами тепла и холода используются для измерения параметров полупроводниковых приборов в диапазоне температур. Так, в проходной камере ПК-5005 можно испытывать до 4200 интегральных микросхем в час в диапазоне температур от -65 до 155°C .

Для полностью автоматизированного контроля параметров микросхем используют ИИС с такими мини- и микроЭВМ, как "Интеграл", "Вахта", "Электрон" и др. Развитие техники требует дальнейшего совершенствования точности, быстродействия, производительности и надежности ИИС.

Внедрение новых принципов конструирования измерительного оборудования на основе БИС и СБИС, модульной компоновки блоков с плоским монтажом и плоскими кабелями обеспечивает его безотказную работу в течение длительного времени эксплуатации, что особенно важно при создании ГАП. При создании ГАП имеет важное значение контроль исправности оборудования, качества исходных материалов и полуфабрикатов в процессе производства, а также готовой продукции. Точность работы измерительного оборудования и его надежность определяют качество продукции, выпускаемой ГАП.

Гибкое автоматизированное производство требует самоконтроля выпускаемых изделий. Так, предполагают, что при дальнейшем развитии изделий микроэлектроники, в частности СБИС, время измерения параметров будет увеличиваться. Встроенный контроль, при котором часть полупроводникового кристалла должна использоваться для размещения интегрального устройства тестирования, осуществляющего по сигналу извне самоконтроль микросхемы с передачей результата в центральную измерительную систему, позволит повысить производительность труда и качество выпускаемых приборов.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы используют для измерения токов и напряжений и по каким системам они работают?
2. Каковы назначение и принцип действия измерительного генератора?
3. Какова структурная схема осциллографа?
4. Как устроены и работают термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления?
5. Каков принцип действия автоматических потенциометров и уравновешенных мостов?
6. Каковы особенности конструкции различных приборов для измерения давления?
7. Каков принцип действия простейшего ротаметра?
8. Почему необходимо поддерживать производственную атмосферу на оптимальном уровне?
9. Каково назначение измерительно-информационных систем?

ГЛАВА ВТОРАЯ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ

§ 7. Электронная гигиена

Производство надежных и долговечных полупроводниковых приборов и микросхем даже при правильно выбранной технологии немыслимо без соблюдения производственной гигиены, под которой понимают комплекс мероприятий, обеспечивающих защиту элементов и деталей приборов от всевозможных загрязнений. Кристаллы и пластины с электронно-дырочными переходами, соответственно составляющие основу полупроводниковых приборов и микросхем, особенно чувствительны к попаданию на них влаги, кислот, щелочей и других веществ. Взаимодействуя с парами воды, эти вещества образуют подвижные заряды-ионы, переносящие ток через переход и нарушающие нормальную работу прибора, особенно после его разогрева.

Чтобы обеспечить выполнение требований производственной гигиены, необходимо правильно выбрать район расположения предприятия, конструкцию здания, размещение цехов, обеспечить в рабочих помещениях определенные влажность и температуру, а также провести организационные мероприятия, направленные на выполнение правил производственной гигиены работающими. Основные виды загрязнений цехов — это пыль, пары воды и газы.

Стандартом установлено следующее разделение производственных помещений и рабочих объемов в зависимости от максимальной концентрации частиц в 1 л воздуха: 0; 5; 35; 350; 1000; 3500; 10 000; 35 000. Этим же стандартом определен единый минимальный размер аэрозольных частиц в воздушной среде производственных помещений и технологических газах, равный 0,5 мкм. В зависимости от характера выполняемых работ относительная влажность воздуха производственных помещений должна поддерживаться в диапазоне 40–60%, а температура — от 20 до 27°С.

Такие технологические операции, как окисление, диффузия, наращива-

ние эпитаксиальных слоев, должны выполняться в рабочем объеме (зоне загрузки) с концентрацией не более 5 частиц пыли в 1 л воздуха при концентрации не более 3500 частиц пыли в общем объеме производственного помещения. Если эти операции проводятся в специальных гермозонах (чистых коридорах), концентрация частиц пыли должна быть не более 350 в 1 л воздуха. Температура в зоне загрузки должна быть в пределах 18–27°С, относительная влажность — 40–60%, технологические газы (азот, кислород, водород, аргон) — класса чистоты 1, деионизованная вода — марки А.

Примерно при тех же условиях, но в помещениях с концентрацией не более 35 частиц в 1 л воздуха производят вакуумное нанесение диэлектрических и проводящих слоев.

Если проследить основные причины образования загрязнений, окажется, что на поверхности полупроводниковых пластин адсорбируются молекулы газов, так как поверхностные атомы кристаллической решетки полупроводника имеют ненасыщенные связи и поэтому обладают высокой химической активностью. Какие бы меры по сохранению чистоты поверхности полупроводниковых пластин не предпринимались, защитить их от загрязнений невозможно, т.е. нельзя получить идеально чистую поверхность, на которой отсутствуют посторонние атомы или молекулы.

Назначение электронной гигиены — создание условий для получения практически чистых поверхностей полупроводниковых пластин. Такие поверхности имеют однородный химический состав второго слоя атомов.

Полупроводниковые пластины после механической обработки должны иметь минимальную глубину разрушенного слоя монокристалла (минимальную шероховатость) и загрязненность, так как эти дефекты проявляются на последующих операциях технологического процесса и приводят к значительному браку. Так, на поверхности полупроводниковой пластины с неровностями и царапинами при выращивании пленки диоксида кремния образуются микропоры и нарушается сплошность покрытия. В эти микропоры при диффузии попадает диффузант и образуются дефекты.

На качество эпитаксиальных слоев влияют осевшие на пластины пылинки, неудаленные кислоты, растворители, а также примеси в газе-носителе, газовом травителе, легирующих составах.

Дефекты эпитаксиальных слоев определяются наличием примесей в кремниевых подложках (пластинах), а также захватываемых в процессе наращивания. При прямых процессах эпитаксии наличие примесей в подложках способствует образованию дислокаций. При не прямых процессах эпитаксии, когда наращиваемый слой образуется при разложении кремниевых соединений, дефектов образуется еще больше, так как в переносе кремния участвует значительное количество веществ и, следовательно, совершается больше реакций. Примесь кислорода в газе-носителе приводит к образованию центров дислокаций и локальных дефектов упаковки. Посторонние частицы, температура плавления (сгорания) которых выше температуры плавления подложек, обволакиваются растущим слоем и являются центрами локальных дефектов.

Качество металлических пленок существенно зависит от состояния поверхности подложек, их температуры и наличия большого количества

остаточных газов в рабочем объеме вакуумной установки. Хорошая адгезия не образуется, если при осаждении металла температура нагрева недостаточна, а поверхность подложки загрязнена. Большое количество остаточных газов способствует изменению структуры и свойств металлических пленок. Так, при соединении алюминия с остаточным кислородом получается оксид алюминия, отличающийся по физико-химическим свойствам от алюминия. Если попытаться присоединить термокомпрессией электродные выводы к такому слою, то контакт будет ненадежным и иметь большое сопротивление.

Для сокращения загрязнений до минимума необходимо не отступать от технологического процесса изготовления изделий электронной техники, выполнять требования стандарта по электронной гигиене, использовать в основном и вспомогательном производствах, а также в оборудовании и оснастке материалы нужной кондиции. Ремонтировать оборудование разрешается только на специальных площадках во вне рабочее время, а в исключительных случаях — в рабочее время, но с локализацией места ремонта.

Наиболее важные технологические процессы следует проводить в так называемых чистых комнатах, представляющих собой отдельные камеры, расположенные внутри рабочего помещения и отвечающие требованиям стандарта электронной гигиены. В чистых комнатах выполняются процессы фотолитографии и загрузки полупроводниковых пластин в реакторы термических установок и выгрузки из них. Чтобы исключить или сократить до минимума присутствие людей в чистых комнатах, необходимо оборудовать их транспортными системами, робототехнологическими комплексами, управляемыми микропроцессорами.

В дальнейшем, когда появится возможность полностью исключить прикосновение рук человека к полупроводниковым пластинам, на самых ответственных стадиях изготовления приборов в чистых комнатах можно будет применять аналитико-диагностические модули, которые позволят управлять технологическими процессами на расстоянии с передачей информации внешней ЭВМ, расположенной на центральном пульте гибкого автоматизированного производства.

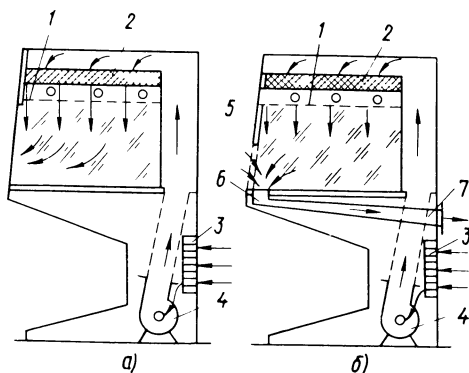
Следует отметить, что стоимость оснащения чистых комнат высока. Для экономии в полупроводниковом производстве оборудуются специальные рабочие места — скафандры (боксы) и герметизированные линии, состоящие из скафандров, внутри которых создают микроклимат. В последнее время вместо герметичных скафандров с микроклиматом широко используются пылезащитные камеры с ламинарным потоком воздуха, так как они просты в изготовлении и эксплуатации, имеют большой объем и удобны для размещения различного оборудования и работы сборщиков и операторов.

Пылезащитные камеры с вертикальным ламинарным потоком воздуха, предназначенные для выполнения операций без выделения продуктов химических реакций и с выделением их, показаны на рис. 21, а, б. Воздух из помещения засасывается вентилятором 4 через воздухозаборную решетку 3 с фильтром предварительной очистки, очищается высокоэффективным фильтром 2 и подается в пылезащитную камеру.

Высокоэффективный фильтр занимает верхнюю часть камеры. Рабочая

Рис. 21. 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 с фильтром предварительной очистки воздуха, 4 — вентилятор, 5 — подъемная стеклянная шторка, 6, 7 — отверстие и воздуховод для удаления загрязненного воздуха



площадь фильтра в несколько раз больше площади выходного сечения камеры, что обеспечивает хорошую очистку воздуха. За фильтром расположена перфорированная решетка 1, делящая на отдельные струи воздушный поток, ламинарность которого создается при скоростях 0,2–0,5 м/с. При такой скорости воздушного потока в пылезащитной камере за 1 ч меняется примерно 1500 объемов воздуха, для чего необходим вентилятор высокой производительности.

В результате очистки в 1 л воздуха содержится не более четырех частиц, равных 0,5 мкм. Выделяющиеся в процессе работы аэрозоли сразу удаляются. Время создания рабочей атмосферы в пылезащитной камере перед началом работы не более 1 мин.

Пылезащитная камера освещается лампами, расположенными между высокоэффективным фильтром и перфорированной решеткой, которая способствует также равномерной освещенности стола (не менее 2000 лк). С лицевой стороны камера закрывается подъемной стеклянной шторкой 5. Из пылезащитных камер, служащих для выполнения операций без выделения вредных паров и газов, очищенный воздух попадает в помещение, что снижает его общую запыленность.

В передней кромке стола пылезащитных камер, предназначенных для выполнения операций с выделением продуктов химических реакций, имеется прямоугольное отверстие 6, закрытое сеткой и служащее для удаления загрязненного воздуха по специальному воздуховоду 7.

§ 8. Технологические среды

Основные процессы изготовления полупроводниковых приборов выполняют в газовых средах высокой чистоты, которые делятся на восстановительные (водород и его смеси с инертными газами), нейтральные (азот и инертные газы) и окислительные (кислород, пары воды). Наиболее широко используются водород, азот и аргон. В промышленных масштабах водород (для производства полупроводниковых приборов и микросхем) получают электролизом из воды, а азот и аргон — сжижением и ректификацией воздуха. Газы промышленного изготовления по своим характеристикам непригодны для использования в качестве защитной атмосферы при техно-

логических процессах, непосредственно связанных с изготовлением *p-n*-переходов. Поэтому их дополнительно очищают от примесей.

Из всех примесей, встречающихся в водороде, аргоне и азоте, вредное влияние на качество полупроводниковых приборов и микросхем при их производстве оказывают в основном кислород и пары воды. Чем меньше содержание влаги в каком-либо газе, тем при более низкой температуре она начинает конденсироваться. Температуру, при которой происходит конденсация влаги, содержащейся в газе, называют температурой точки росы или точкой росы. Естественно, что чем ниже точка росы, тем меньше влаги содержится в газе. Газы, очищенные в достаточной степени от кислорода и паров воды, надежно обеспечивают безокислительный нагрев при всех технологических процессах.

Очищают газы в специальных установках (рис. 22). Очищаемый водород через ротаметр 1 подают в реактор 3 с палладированным алюмогелем, где происходит каталитическое связывание кислорода с водородом, в результате которого образуется вода. При очистке азота и аргона от кислорода водород специально в оптимальных количествах вводят в реактор 3 через ротаметр 1 и дозатор 2. Чтобы исключить конденсацию образовавшейся воды, реактор подогревают.

Очистка газов от водорода происходит в реакторе 4 с оксидом меди, нанесенным на активный глинозем. При этом свободный водород, вступая во взаимодействие с оксидом меди, восстанавливает его с образованием воды. Здесь же газ вторично очищается от кислорода, так как восстановленная медь снова вступает в реакцию с кислородом, связывая его. Для интенсификации процесса восстановления реактор 4 также подогревают. Таким образом, пройдя оба реактора, газ освобождается от кислорода, но при этом увлажняется образующейся водой, которая конденсируется в трубчатом холодильнике 5 и в виде конденсата удаляется из него.

Для окончательной осушки очищаемых газов служат два работающих поочередно адсорбера 7, заполненные в зависимости от необходимой степени осушки силикагелем или цеолитом*. При работе одного из адсорберов в другом происходит регенерация адсорбента азотом (или воздухом), который, проходя через вентили 8 и подогреватель 9, нагревается до необходимой температуры. Регенерируют адсорбент в течение времени, необходимого для восстановления его полной работоспособности. Очищенный и осушенный газ направляется к потребителю через вентиль 8 и фильтр 6, служащий для улавливания механических примесей, выносимых газом из установки очистки.

Очисткой по такой технологической схеме получают аргон и азот с содержанием кислорода до $5 \cdot 10^{-4}\%$ и точкой росы от -60 до -70°C и водород — с содержанием кислорода до $1 \cdot 10^{-4}\%$ и точкой росы от -65 до -70°C . Для некоторых современных технологических процессов (например, эпитаксии) требуется водород повышенной чистоты, близкой к спектральной. Получают такой водород диффузионной очисткой, пропуская его

* Силикагель (пористый гель кремниевой кислоты) и цеолит (полигидрат алюмосиликата) — вещества-адсорбенты, служащие для поглощения влаги и других примесей газов хорошо развитыми поверхностями.

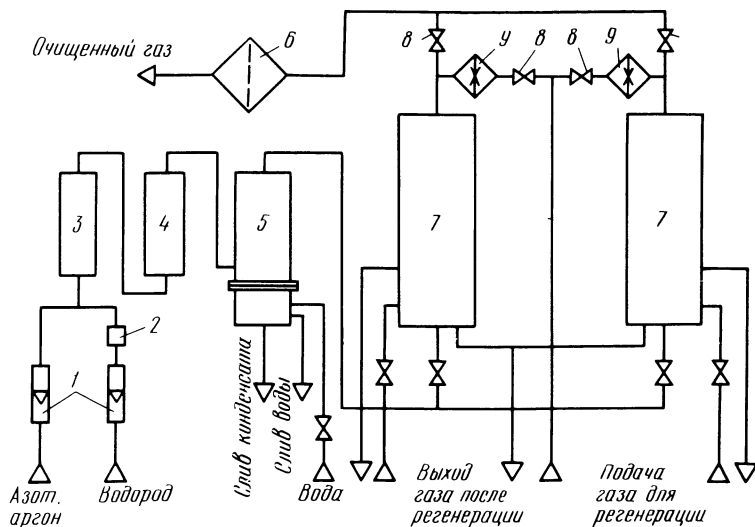


Рис. 22. Схема установки очистки газов:
 1 — ротаметры, 2 — дозатор водорода, 3, 4 — реакторы с палладированным алюмогелем и оксидом меди, 5 — холодоильник, 6 — фильтр, 7 — адсорбенты, 8 — вентили, 9 — подогреватели воздуха (азота) для регенерации

через металлическую перегородку или мембрану из сплава палладия с платиной, серебром, золотом или другими металлами.

Не менее важным этапом производства полупроводниковых приборов и микросхем является очистка воды от примесей. Для промывки деталей и собранных конструкций приборов после различных химических операций используют деионизованную воду, получаемую обработкой дистиллированной воды (конденсата) ионообменными смолами (ионитами). Деионизованную воду называют также очищенной или обессоленной.

Обработка ионообменными смолами основана на их способности связывать ионы растворимых в воде примесей в нерастворимые органические соединения (рис. 23). Очищаемую воду последовательно пропускают через две колонки 1 и 3, заполненные смолами, соответственно поглощающими катионы (катионитами) и связывающими анионы (анионитами). Процессы обмена катионов и анионов, называемые катионированием и анионированием, получили широкое распространение в производстве полупроводниковых приборов и микросхем для смягчения, обессоливания и обескремнивания воды. Для удаления углекислого газа после катионирования служит дегазатор 2, в котором очищаемая вода продувается противотоком воздуха.

Продолжительность рабочего цикла ионообменных смол определяется их обменной емкостью, т.е. способностью к ионному обмену. После использования ионита до заданного предела обменной емкости необходимо восстановить его обменную способность, удаляя задержанные из обрабатываемой воды ионы и вводя взамен них ионы, которые он отдавал воде в период рабочего цикла. Тем самым образом, восстановление истощенного ионита

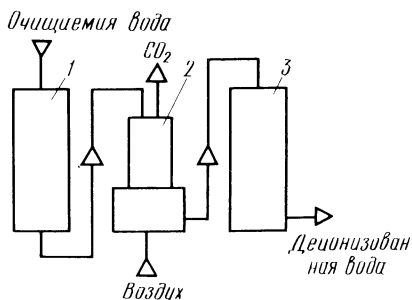


Рис. 23. Схема установки очистки воды ионнообменными смолами:
1 — катионитовая колонка, 2 — дегазатор, 3 — анионитовая колонка

является процессом ионного обмена, проводимого в обратном порядке. В качестве катионитов обычно применяют смолу КУ-2-82, а в качестве анионитов — АН-31 или ЭДЭ-10П. Выпускаются эти смолы в виде мелких гранул.

Основными показателями качества деионизованной воды являются ее удельное электрическое сопротивление и содержание органических веществ. Чем больше сопротивление и меньше содержание органических веществ, тем качество деионизованной воды выше.

Установки централизованной очистки воды позволяют получать деионизованную воду, удельное электрическое сопротивление которой не ниже 2 МОм·см. Выпускаемые промышленностью ионообменные установки централизованной очистки воды УЦ-2, УЦ-5 и УЦ-10 (соответственно производительностью 2,5 и 10 м³/ч) построены по типовой технологической схеме и изготавливаются из унифицированных элементов.

Для промывки кристаллов и пластин с электронно-дырочными переходами применяют воду с более высоким удельным сопротивлением (10—12 МОм·см), получаемую дополнительной очисткой в финишных ионообменных установках УФ-250 и УФ-400 соответственно производительностью 250 и 400 л/ч. Кроме того, для финишной очистки воды используют электроионитовые установки (например, УФЗ-250), принцип действия которых основан на одновременной очистке воды ионообменными смолами и постоянным током.

§ 9. Очистка полупроводниковых пластин, технологической оснастки и тары

Действие загрязнений особенно усиливается при термических процессах, так как именно при высоких температурах диффузия примесей (загрязнений) из поверхностного слоя в глубь пластины протекает наиболее интенсивно.

Органические загрязнения удаляют с полупроводниковых пластин обработкой в растворителях — трихлорэтилене, толуоле, ацетоне, спирте (иногда в подогретых растворителях ультразвуковым воздействием) и последующей промывкой в деионизованной (лучше горячей) воде. Механизм очистки состоит в замещении сорбированных поверхностью пластины агломератов и молекул загрязнений молекулами растворителя. При промывке в деионизованной воде происходит десорбция молекул растворителя, в

результате которой они переходят в жидкость. Наилучшую очистку получают, промывая пластины в проточной деионизованной воде.

Солевые загрязнения хорошо растворяются в воде, поэтому их удаляют, промывая пластины в горячей деионизованной воде (лучше с ультразвуковым воздействием). Механические загрязнения удаляют гидромеханической обработкой ультразвуком в жидкостях. Такая обработка дает хороший эффект после предварительного травления поверхности. При этом загрязнения вместе с растворенным поверхностным слоем переходят в раствор. Кроме того, механические загрязнения удаляют одновременно с другими видами загрязнений.

От ионов некоторых металлов поверхности пластин освобождают последовательной обработкой в царской водке, фтористоводородной кислоте и проточной деионизованной воде.

Технологическую оснастку и межоперационную тару для обработки и переноса полупроводниковых пластин также тщательно очищают от всех видов загрязнений. Изготавливают оснастку и тару из особо чистых материалов: кварца, графита (для термических процессов), фторопласта, винипласта (для химических процессов), нержавеющей стали, алюминия и его сплавов, керамики, полиэтилена, полистирола и некоторых других пластмасс.

При работе оснастка и тара загрязняются (пылью, конденсирующимися парами химреактивов), поэтому их рекомендуется обрабатывать щелочными (содовыми) растворами, а затем промывать деионизованной водой. Металлическую тару для хранения полупроводниковых пластин применять не рекомендуется, чтобы не загрязнять их ионами металлов, оказывающих вредное влияние на электронно-дырочные переходы. Даже пинцеты должны быть из пластмассы (фторопласта) или из хромированной стали с наконечниками из фторопласта либо кварца.

Кассеты, применяемые в некоторых установках для монтажа кристаллов, как правило, изготавливают из нержавеющей стали. Кассеты для пайки корпусов выполняют из нержавеющей стали или керамики. Чтобы металлические кассеты не смачивались припоем (особенно чистым серебром), их специально периодически окисляют при 900°C во влажном водороде в течение 20 мин. Все кассеты требуют очистки от загрязнений. Поэтому их периодически промывают в растворителях, а затем деионизованной водой и сушат.

§ 10. Полупроводниковые приборы, микросхемы и их корпуса

Важнейшими изделиями электронной техники являются полупроводниковые диоды (или просто диоды), транзисторы и микросхемы. Основу полупроводникового прибора составляет кристалл полупроводникового материала (полупроводника — германия, кремния, арсенида галлия и др.) с одним или несколькими электронно-дырочными переходами. Электронно-дырочный переход представляет собой систему, состоящую из полупроводников с различными типами электропроводности — электронной n и дырочной p , разделенных запирающим слоем, обедненным носителями заря-

дов и образующимися вследствие диффузии примеси вблизи границы областей перехода.

Д и о д (рис. 24, а) — полупроводниковый прибор, предназначенный для выпрямления переменного тока, преобразования электрических колебаний одной частоты в колебания другой частоты, а также детектирования, стабилизации тока и напряжения. Диоды имеют один p - n -переход и две неоднородные области: базовую область исходного полупроводникового материала (например, n -типа электропроводности) и эмиттерную область другого типа электропроводности (p -типа), созданную в процессе термической обработки.

Т р а н з и с т о р (рис. 24, б) — полупроводниковый прибор, предназначенный для генерирования и усиления электрических колебаний, усиления мощности, преобразования напряжения, а также для переключений в различных схемах электронных устройств.

Транзисторы имеют два p - n -перехода и три области — эмиттерную, базовую и коллекторную (например, p - n - p или n - p - n). Полупроводниковые приборы могут иметь большее количество p - n -переходов и неоднородных областей.

В зависимости от вида носителей зарядов транзисторы разделяют на биполярные (носителями являются как электроны, так и дырки) и униполярные (носителями являются электроны или дырки). Биполярные транзисторы — это обычные полупроводниковые приборы, для изготовления p - n -переходов которых необходим высококачественный монокристаллический полупроводниковый материал. Униполярные, или полевые транзисторы (управляют током прибора электрическим полем) подразделяют

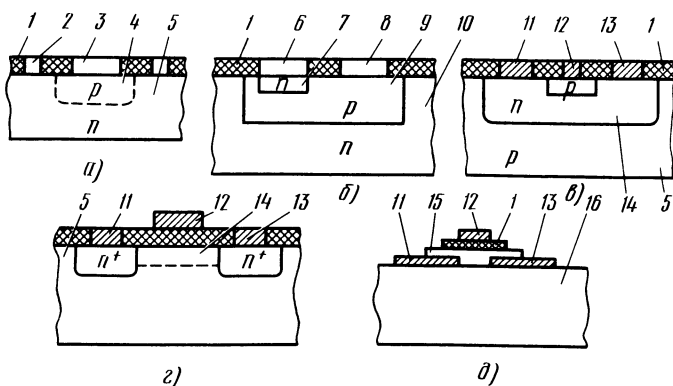


Рис. 24. Структуры полупроводниковых приборов:
а — диода, б, в — биполярного и униполярного диффузионных транзисторов, г — МОП-транзистора, д — пленочного полевого транзистора с изолированным затвором; 1, 15 — пленки диоксида кремния и поликристаллического полупроводника, 2, 3 — невыпрямляющие контакты к n - и p -областям, 4 — p -область, 5 — кристалл, 6, 8 — невыпрямляющие контакты к эмиттеру и базе, 7 — эмиттер, 9 — база, 10 — коллектор, 11 — исток, 12 — затвор, 13 — сток, 14 — канал, 16 — подложка

на диффузионные полевые (рис. 24, а) и металл-окисел-полупроводниковые (МОП-транзисторы, рис. 24, з).

В полевых транзисторах ток проходит через полупроводниковый канал между двумя электродами — истоком и стоком. В свою очередь, МОП-транзисторы бывают с диффузионным (пропускают ток при отсутствии напряжения на затворе — нормально включенные) и индуцированным (не пропускают ток при отсутствии напряжения на затворе — нормально выключенные) каналами. Электрод, управляющий шириной канала, называют затвором. Транзисторы с диффузионными каналами работают в режимах обеднения и обогащения (соответственно уменьшается или увеличивается поступление основных носителей зарядов), а транзисторы с индуцированным каналом — только в режиме обогащения.

МОП-транзисторы с индуцированным каналом потребляют мало электроэнергии, имеют высокое входное сопротивление ($10^{15} - 10^{16}$ Ом) и полное отсутствие тока при нулевом напряжении на затворе. Эти транзисторы могут создаваться с каналом *n*- или *p*-типа и основными носителями зарядов в них соответственно являются электроны или дырки. МОП-транзисторы можно изготавливать на одной подложке без разделения, так как затворы их изолированы от подложки.

В настоящее время созданы полевые транзисторы на основе использования поликристаллических пленок полупроводниковых материалов (рис. 24, д).

М и к р о с х е м а, или **и н т е г р а л ь н а я с х е м а**, — полупроводниковый прибор, представляющий собой одно или несколько функциональных устройств (усилитель, мультивибратор и др.) и состоящий из активных (диоды, транзисторы) и пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности, токопроводящие дорожки) компонентов, загерметизированных в одном блоке — корпусе или залитых пластмассой.

Промышленностью выпускаются микросхемы двух основных типов: полупроводниковые и тонкопленочные. Полупроводниковая микросхема — это монолитная, физически неразделимая структура, представляющая собой полупроводниковый кристалл, в объеме и на поверхности которого одновременно созданы активные и пассивные компоненты. Тонкопленочная микросхема — это монолитная структура, пассивные и активные компоненты которой изготовлены на поверхности диэлектрической подложки в виде пленок. Так как пока не удается изготовить достаточно надежные пленочные активные компоненты, промышленное развитие получила гибридная технология тонкопленочных микросхем (условно тонкими считаются пленки толщиной от тысячных долей микрометра до нескольких микрометров). В гибридных микросхемах пассивные компоненты напыляют в виде тонких пленок на диэлектрическую подложку, а активные монтируют на нее в виде навесных дискретных (отдельных) элементов.

Полупроводниковая и тонкопленочная микросхемы показаны на рис. 25. Кроме того, изготавливают толстопленочные микросхемы.

К о р п у с а предназначены для монтажа кристаллов с электронно-дырочными переходами, защиты их от климатических и механических воздействий и включения в электрическую цепь. Корпуса классифицируют по назначению, свойствам помещаемых в них электронно-дырочных пе-

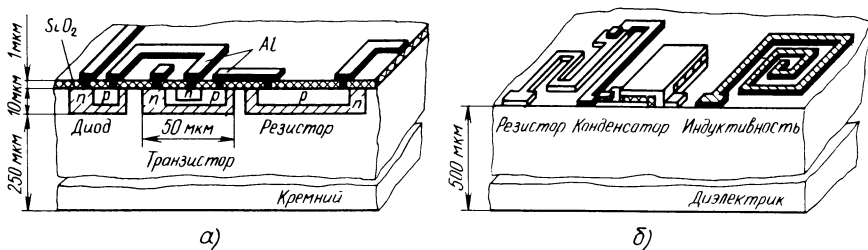


Рис. 25. Микросхемы:
а — полупроводниковая, б — тонкопленочная

переходов, конструкции и материалу изоляторов, методу герметизации, тепловому сопротивлению и другим признакам.

В зависимости от назначения корпуса бывают для диодов, транзисторов, интегральных микросхем и других устройств (оптоприборов, модулей и т.д.).

В зависимости от мощности рассеивания корпуса бывают для мало-мощных, средней и большой мощности полупроводниковых приборов и микросхем, а по частотным свойствам — для низкочастотных, средней, высокой и сверхвысокой частоты (СВЧ).

В зависимости от конструкции изоляторов корпуса бывают с одиночными выводами и с несколькими, проходящими через одну изолирующую деталь, чашечного типа, с отдельными проходными, скрытыми внутри изолятора, наружными одно- и многорядными выводами. Изоляторы могут быть стеклянные, металlostеклянные, керамические, металлокерамические, пластмассовые, металлопластмассовые, опрессованные (залитые) пластмассой, а также комбинированные. По материалу, а также конструкции изоляторов получили названия и корпуса, т.е. они могут быть стеклянными, металlostеклянными, металлокерамическими и т.д.

В зависимости от метода герметизации корпуса можно разделить на герметизируемые контурной контактной электросваркой, холодной сваркой, пайкой, стеклом, пластмассой, клеем и др.

Корпуса полупроводниковых приборов и микросхем классифицируют также по тепловому сопротивлению R_t ($^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$), которое определяется отношением разности температур корпуса и окружающей среды к увеличению выделяющейся мощности. Чем меньше тепловое сопротивление корпуса, тем большую мощность он может рассеять. При этом большой запас по мощности иметь нерационально, так как увеличиваются габариты корпусов и требуются материалы для их изготовления, обладающие значительной теплопроводностью.

К корпусам полупроводниковых приборов и микросхем предъявляют определенные требования. Так, они должны: отводить теплоту; обеспечивать удобство и надежность монтажа кристаллов с электронно-дырочными переходами при сборке, а также заданные электрические характеристики и надежный монтаж в аппаратуре; выдерживать допустимые для кристаллов электрические нагрузки, механические и климатические воздействия; быть коррозионно-стойкими, простыми по конструкции и иметь низкую стоимость.

Для полупроводниковых СВЧ-приборов требуются специальные корпуса, способные рассеивать на сверхвысоких частотах большую мощность. Сложность изготовления СВЧ-приборов и корпусов для них состоит в том, что отдаваемая (выходная) мощность и частота взаимосвязаны: увеличение отдаваемой мощности снижает рабочую частоту. Мощность полупроводникового прибора определяется его способностью рассеивать выделяемую при работе теплоту, а частота зависит от его паразитных индуктивности и емкости. Чем меньше собственные индуктивность и емкость прибора, тем выше частота, на которой происходит отдача максимальной мощности.

Рассмотрим конструкции корпусов диодов, транзисторов и микросхем.

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) в металлокерамическом корпусе (рис. 26) состоит из медного основания (фланца) 2, керамической втулки 7 и металлических колец 6, герметично спаянных между собой и с основанием. В центре медного основания смонтирован алмазный теплоотвод 3, представляющий собой куб с гранью 1 мм, на верхней части которого припаян полупроводниковый кристалл 1, соединенный золотым полосковым выводом 4 с верхним металлическим кольцом. Герметизируют такой корпус, припаявая низкотемпературным припоем металлическую крышку 5. Алмазный теплоотвод перед пайкой металлизуют, последовательно нанося слой титана (толщиной 60 нм), платины (200 нм) и золота (1000 нм). Рассмотренный лавинно-пролетный диод является мощным СВЧ-прибором — генератором.

Мощный высокочастотный транзистор (рис. 27) имеет металlostеклянный корпус, состоящий из металлического (стального) фланца 2 и двух выводов 6, образующих герметичный спай стекло — металл. Два кремниевых кристалла 4 с электронно-дырочными переходами смонтированы на термокомпенсирующих подкладках 3. Проволочными электродными вы-

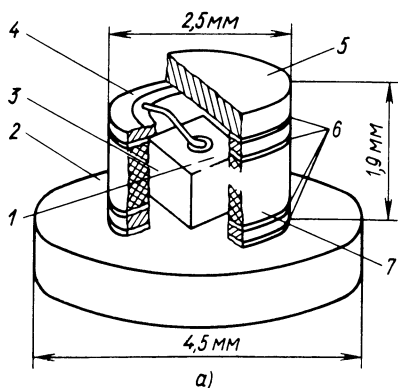


Рис. 26. Лавинно-пролетный диод в металлокерамическом корпусе:

1 — кристалл, 2 — фланец, 3 — алмазный теплоотвод, 4 — полосковый вывод, 5 — крышка, 6 — металлические кольца, 7 — керамическая втулка

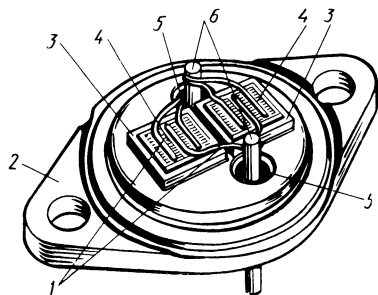


Рис. 27. Мощный транзистор в металlostеклянном корпусе:

1, 6 — электродные и наружные выводы, 2 — фланец, 3 — подкладки, 4 — кристаллы, 5 — стеклянные изоляторы

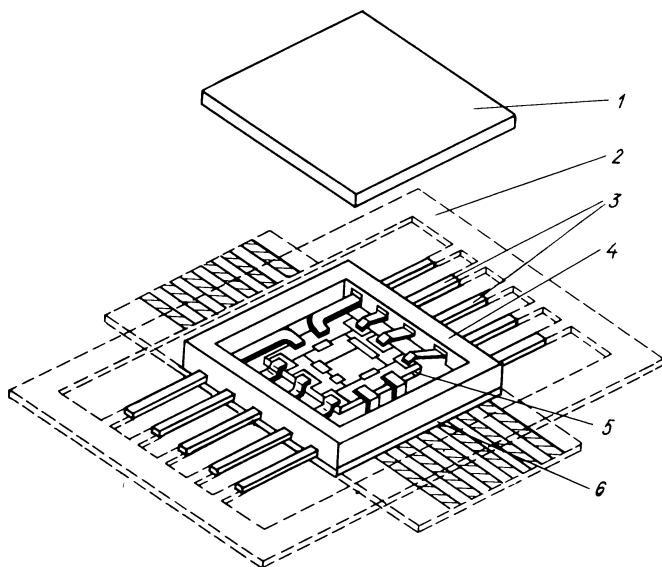


Рис. 28. Тонкопленочная микросхема в плоском корпусе:
1 — крышка, 2 — выводная рамка, 3 — наружные выводы, 4 — изолятор, 5 — микросхема, 6 — основание

водами 1 активные области кристаллов соединены пайкой с наружными выводами 6 корпуса. Герметизируют корпус транзистора крышкой (на рис. 27 не показана), которую контурной контактной электросваркой приваривают к фланцу 2.

Микросхема (рис. 28) собрана паучковым методом в плоском корпусе, состоящем из основания 6 с токоведущими дорожками, выводной рамки 2 (которая после сборки обрубается по периметру), рамочного изолятора 4 и крышки 1. Собственно микросхема 5 смонтирована внутри изолятора и ее элементы соединены с наружными выводами 3 корпуса. Герметизируют корпус микросхемы, приклеивая крышку 1.

§ 11. Обработка полупроводниковых материалов и подложек

Основными полупроводниковыми материалами, применяемыми для изготовления полупроводниковых приборов и активных компонентов микросхем (кристаллов с электронно-дырочными переходами), являются монокристаллические кремний и германий. Преимущественно используют кремний, так как он по сравнению с германием обладает более широкой запрещенной зоной, что повышает рабочую температуру приборов в два раза (до 150°С), в тысячу раз меньшими обратными токами p - n -переходов и хорошей способностью окисляться с образованием защитной диэлектрической пленки диоксида кремния.

Монокристаллические слитки кремния или германия получают выращиванием из расплава, а затем ориентированно режут на пластины требуемой

толщины. Ориентирование слитков по кристаллографическим осям выполняют рентгеновским или световым методом для получения заданных характеристик полупроводниковых материалов, которые определяют параметры создаваемых электронно-дырочных переходов.

Разрезанные алмазным диском полупроводниковые пластины механически шлифуют и полируют обычно до толщины 0,2 мм, используя абразивный и алмазный шлифующие материалы. В результате механической обработки получают пластины с минимальными шероховатостью и отклонениями от плоскостности и плоскопараллельности сторон. Даже такая тонкая обработка поверхности полупроводниковых пластин оказывается недостаточно высокого качества (имеются отдельные микроцарапины), что может способствовать увеличению брака при изготовлении электронно-дырочных переходов и пассивных компонентов микросхем. Поэтому перед процессами эпитаксии, диффузии и осаждения пленок полупроводниковые пластины подвергают химической полировке — химическому или газовому травлению (обработке в парах соляной кислоты).

Основанием для осаждения пленок и монтажа компонентов микросхем служат подложки, которые должны иметь плоскую поверхность малой шероховатости, низкую электропроводность, высокие электрическую, механическую прочность и теплопроводность, рабочую температуру, значительно превышающую допустимую для компонентов, химическую инертность и одновременно хорошую адгезию к материалам пленок. Трудно подобрать материалы для подложек, которые бы полностью отвечали этим требованиям. Поэтому обычно выбирают материалы, удовлетворяющие некоторым из них.

В качестве материала подложек обычно используют стекло, керамику, стеклокерамику, сапфир и др. Алюмосиликатные и боросиликатные стекла (щелочные не годятся, так как содержат в своем составе натрий, снижающий поверхностное сопротивление) дешевы, имеют гладкую поверхность, но обладают низкой теплопроводностью и механически непрочны. Керамика не имеет недостатков стекол, но сложен и дорог процесс получения керамических подложек с минимальной шероховатостью поверхности.

Широкое применение получили подложки из стеклокерамики: ситалла и фотоситалла. Ситалл — материал, получаемый кристаллизацией стекла, но обладающий лучшими параметрами (большими механической прочностью и теплопроводностью; лучше обрабатывается и обезгаживается). Разновидностью ситалла является фотоситалл (закристаллизованное светочувствительное стекло), отличающийся от него повышенной теплопроводностью. Сапфир по своим характеристикам превосходит перечисленные материалы, но довольно дорог и обработка его более трудоемка.

Механическая обработка подложек из различных материалов аналогична механической обработке полупроводников.

§ 12. Фотолитография

Фотолитография является важнейшей частью планарной технологии, с помощью которой получают (химически гравировуют) окна (рисунки) различной конфигурации в диэлектрических и металлических пленках при производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Структурная схема технологического процесса контактной фотолитографии показана на рис. 29. В полупроводниковом производстве применяют, кроме того, проекционную фотолитографию, а также электроно- и рентгенолитографию. Под контактной фотолитографией понимают экспонирование, при котором фотошаблон наложен на слой фоторезиста (светочувствительного вещества), покрывающий подложку (полупроводниковую пластину). При проекционной фотолитографии изображение рисунка с фотошаблона проецируют через специальный объектив с высокой разрешающей способностью на подложку, покрытую слоем фоторезиста. В электроно- и рентгенолитографии для переноса рисунка с шаблона на резист используют электронные и рентгеновские пучки вместо световых (ультрафиолетовых), применяемых при контактной и проекционной фотолитографии. Электронные и рентгеновские пучки в несколько раз повышают разрешающую способность (количество линий, приходящихся на единицу длины), что позволяет изготавливать элементы полупроводниковых приборов и микросхем субмикронных размеров.

Фотолитографию выполняют, например, на кремниевых подложках с нанесенными в процессе термической обработки пленками диоксида кремния, примесносиликатных стекол (фосфоро- и боросиликатных) или металлов (алюминия, молибдена). После нанесения каждого слоя подложки очищают от загрязнений. Если после термической обработки подложек на них сразу нанести фоторезист (в течение 1 ч), тогда очистка не требуется.

Известно несколько способов нанесения фоторезиста на подложки: распылением, валиками, электростатическим осаждением, окунанием, поливом и центрифугированием. Последний способ довольно прост, высокопроизводителен и обеспечивает хорошее качество, поэтому его используют наиболее широко. Толщина слоя фоторезиста при этом прямо пропорциональна частоте вращения подложки на центрифуге.

Фоторезисты представляют собой сложные полимерно-мономерные композиции, в которых под действием ультрафиолетового, электронного

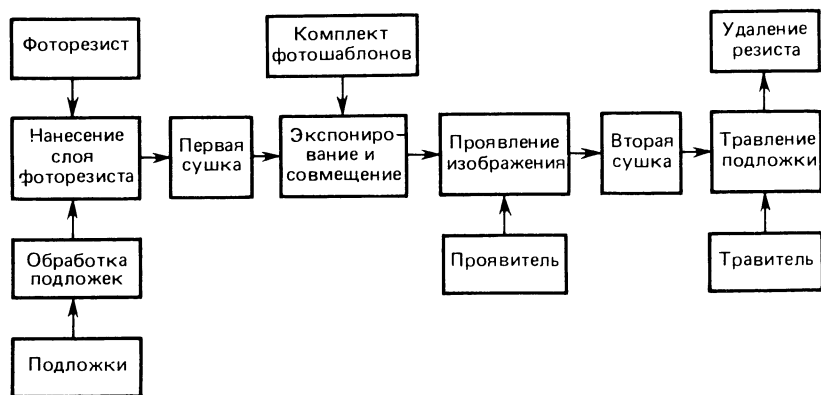


Рис. 29. Структурная схема технологического процесса контактной фотолитографии

или рентгеновского излучений протекают химические процессы и в результате изменяется локальная растворимость. Фоторезисты, растворимость экспонированных участков которых уменьшается, называют **н е г а т и в н ы м и** (рис. 30, а) и, наоборот, фоторезисты, растворимость экспонированных участков которых возрастает, называют **п о з и т и в н ы м и** (рис. 30, б). Фоторезисты характеризуются чувствительностью, разрешающей способностью, стойкостью к воздействию агрессивных веществ, стабильностью свойств во времени и вязкостью. Промышленностью выпускаются позитивные (ФП-383, ФП-РН-7) и негативные (ФН-5ТК, ФН-11, ФН-11К и ФН-4ТВ) фоторезисты.

После нанесения на подложки слоя фоторезиста его сушат в сушильных шкафах или специальных установках с инфракрасными нагревателями для удаления растворителя. В результате в слое создаются напряжения. От стабильности и оптимальности режима первой сушки зависят время экспонирования и точность передачи размеров рисунков фотошаблона на слой фоторезиста.

Экспонирование фоторезиста через фотошаблон выполняют на специальной установке, имеющей мощный источник ультрафиолетового излучения (ртутную лампу), манипулятор и специальный микроскоп. Следует иметь в виду, что время экспонирования и проявления фоторезиста между собой связаны, так как от их оптимального подбора также зависит точность передачи размеров рисунков с фотошаблона на фоторезист. Кроме того, на точность передачи размеров рисунков оказывает влияние равномерность освещенности подложки, зазор между пластиной и фотошаблоном, который не должен быть больше глубины резкости микроскопа. При большом увеличении глубина резкости микроскопа составляет 10–20 мкм. Увеличение зазора не позволяет одновременно наблюдать совмещаемые рисунки на фотошаблоне и пластине. При минимальном зазоре ширина линий рисунка составляет 1 мкм и менее, но соприкосновение с пластиной вызывает быстрый износ фотошаблона. Так, эмульсионные фотошаблоны выходят из строя через 5–10, а хромовые — через 200–300 совмещений.

При первой фотолитографии точное совмещение не требуется, а необходимо лишь наложить рабочее поле фотошаблона на пластину. Точные же совмещения выполняют при второй и последующей фотолитографии, когда на пластины уже нанесены рисунки и их необходимо совместить, чтобы они совпадали с рисунками следующего фотошаблона. Для удобства совмещения на комплекте фотошаблонов делают специальные знаки совмещения (как правило, в виде крестов), расположенные по одним и тем же координатам. Знаки совмещения называют также реперными точками или опорными знаками.

Совмещение может быть визуальным или фотоэлектрическим. На установках с фотоэлектрическим совмещением точность этой операции по паспорту составляет $\pm 0,1$ мкм. Манипуляторы, на которых закрепляются фотошаблоны, обеспечивают такую же точность перемещения. Микроскопы имеют, как правило, плавно или дискретно изменяемое увеличение от 40 до 80 раз для обзора и до 100–400 раз для точного совмещения. Практически из-за объективных и субъективных факторов точность совмещения более низкая.

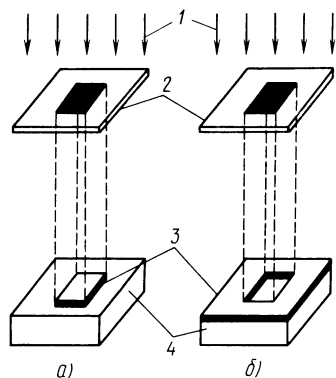


Рис. 30. Схемы проявления позитивного (а) и негативного (б) фоторезисторов:

1 — ультрафиолетовое излучение, 2 — фотошаблон, 3 — фоторезист, 4 — полупроводниковая пластина (подложка)

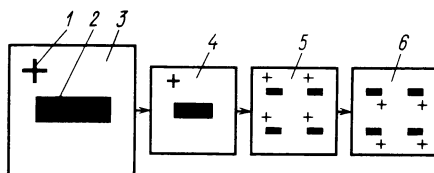


Рис. 31. Последовательность изготовления фотошаблона опико-механическим способом:

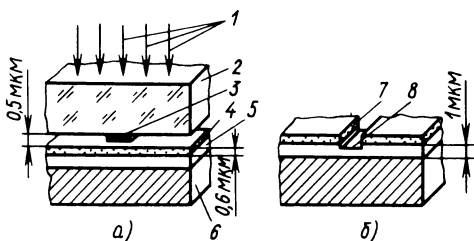
1 — знак совмещения, 2 — элемент рисунка, 3 — оригинал, 4 — промежуточный негатив, 5 — эталонный фотошаблон, 6 — рабочая копия фотошаблона

Фотошаблоны являются в фотолитографии инструментом, от которого во многом зависят как качество выполнения фотолитографии, так и параметры изготовленных полупроводниковых приборов и микросхем. Последовательность изготовления фотошаблона опико-механическим способом показана на рис. 31. Оригинал 3 выполняют на полиэфирной пленке с покрытием, используя координатограф. Подрезая специальным ножом по заданным координатам покрытие, удаляют ненужные участки, оставляя необходимый рисунок 2 и знаки совмещения 1. Изготавливаемый рисунок имеет увеличение от 50 до 1200 раз и точность $\pm (25 \div 15)$ мкм. Затем устанавливают оригинал в репродукционную камеру и уменьшают размеры рисунка примерно до $10 \times 10 - 60 \times 60$ мм, получая промежуточный негатив 4. Следующий этап — уменьшение и мультипликация промежуточного негатива, для чего используют фотоповторители с кратностью уменьшения от 4 до 20 раз. Разрешающая способность их объективов не менее 1500 линий/мм. Это обеспечивает получение рисунков с минимальной шириной линий 1 мкм.

Чтобы обеспечить хорошую совмещаемость фотошаблонов одного комплекта, их одновременно изготавливают на фотоштампе, представляющем собой многообъективный фотоповторитель. При этом получаются у всех шаблонов одинаковые ошибки по шагу. В настоящее время используются 6-, 9- и 12-позиционные фотоштампы. После фотоштампа получают эталонный фотошаблон 5 или эталонный комплект фотошаблонов. Завершающим этапом является получение контактной перепечаткой с эталонного фотошаблона 5 рабочей копии 6. Точность элементов (рисунков) рабочих фотошаблонов составляет $\pm 0,1$ мкм и выше, а количество идентичных изображений на рабочем поле может быть несколько десятков тысяч.

Фотошаблоны изготавливают на оптических стеклах определенных размеров, с минимальным отклонением плоскостности, высокой степенью плос-

Рис. 32. Процесс фотолитографии:
 а — экспонирование, б — создание
 травлением рисунка (окна) в ок-
 сидном слое; 1 — ультрафиолето-
 вое излучение, 2 — фотошаблон,
 3 — рисунок на фотошаблоне, 4 —
 негативный фоторезист, 5 — слой
 диоксида кремния, 6 — кремние-
 вая пластина (подложка), 7 — про-
 явленный слой фоторезиста, 8 —
 частично стравленный слой диокси-
 да кремния



копараллельности, покрытых пленками хрома, кремния или оксида железа. Причем пленки кремния и оксида железа по сравнению с пленками хрома обладают большей стойкостью (допускают до 500 контактирований).

После экспонирования следует проявление фоторезистов: негативных в органических растворителях (толуоле, трихлорэтилене), а позитивных в щелочных растворах (едкого кали, органической щелочи — этаноламина). Проявляющий раствор наносят пульверизатором, что улучшает качество проявления изображений, особенно малых размеров, и позволяет автоматизировать процесс. В результате экспонирования и проявления на фоторезисте образуется рельеф рисунка, устойчивый к действию агрессивных веществ. Проявление фоторезиста — важный процесс, при выполнении которого необходимо следить за температурой и pH раствора. Отклонение температуры и pH раствора от оптимальных значений резко нарушает точность воспроизведения рисунков.

Проявленный фоторезист сушат (вторая сушка) при температуре 120–180°С, поднимая ее медленно, ступенчато, с выдержками, так как от этого также зависит точность передачи размеров рисунка. Затем под защитой фоторезиста травлением получают на подложке требуемый рисунок (рис. 32).

Заканчивается процесс фотолитографии удалением слоя фоторезиста, которое выполняют, обрабатывая подложки в кислотах и органических растворителях, а также плазмохимической, термической или фототермической обработкой. При обработке подложек их поверхности должны быть очищены от веществ, используемых при фотолитографии, и подготовлены к следующим операциям.

Контрольные вопросы

1. Какие требования производственной гигиены предъявляют к рабочим помещениям полупроводникового производства?
2. Как очищают газы от кислорода и паров воды?
3. Каков принцип очистки воды?
4. С какой целью и какими способами очищают полупроводниковые пластины (подложки), а также технологическую оснастку и тару?
5. Каковы устройство и назначение диодов, транзисторов и микросхем?
6. Как классифицируют корпуса полупроводниковых приборов и микросхем?
7. Для каких целей применяют фотолитографию и как ее выполняют?
8. Какие фоторезисты вы знаете и для чего они необходимы в фотолитографии?

§ 13. Общие сведения

Термические процессы, являющиеся важнейшими в технологии полупроводникового производства, позволяют создавать активные (диоды, транзисторы) и пассивные (резисторы, конденсаторы, токоведущие дорожки, индуктивности) компоненты микросхем и дискретные полупроводниковые приборы (диоды, транзисторы), выполнять сборочные операции (присоединение электродных выводов, герметизацию), наносить металлические покрытия (металлизацию) и изготавливать корпуса.

Основными среди термических процессов являются диффузия, эпитаксия, нанесение (осаждение, напыление) различных слоев и окисление. Диффузией получают электронно-дырочные переходы (активные компоненты), эпитаксия способствует повышению качества активных компонентов и сокращает технологический цикл их изготовления, напылением создают невыпрямляющие контакты и пассивные компоненты, а оксидным слоем кремния изолируют, пассивируют, маскируют, защищают поверхности активных и пассивных компонентов. Кроме того, оксиды кремния и других веществ используют в качестве активных диэлектрических элементов некоторых типов полупроводниковых приборов.

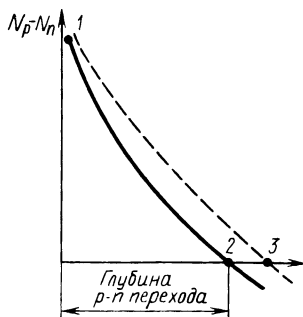
Чтобы понять протекание диффузии, эпитаксии и нанесения металлических пленок, ознакомимся с физикой этих процессов.

Д и ф ф у з и я — взаимное проникновение атомов соприкасающихся веществ вследствие их теплового движения. Процессы диффузии подчиняются двум законам Фика. Первый закон Фика устанавливает линейное соотношение между отдельным потоком диффундирующих атомов и градиентом (разностью) их концентраций. Второй закон Фика связывает градиент концентраций с их изменением во времени. Оба закона описываются дифференциальными уравнениями высшей математики, решая которые можно определить: коэффициент диффузии, характеризующий число атомов, проходящих в единицу времени через единицу площади поверхности при единичном градиенте концентрации; поток атомов через данную поверхность; количество вещества, продиффундировавшего за определенное время.

Разность концентраций легирующих веществ (примесей) в полупроводнике является движущей силой диффузии. Чем эта разность больше, тем интенсивней происходит перемещение атомов примеси из областей с большей концентрацией к областям с меньшей концентрацией. Распределение концентрации примеси по глубине δ полупроводника от максимальной (точка 1) до минимальной на глубине образования *p-n*-перехода (точка 2) и далее до постоянной исходной (точка 3) показано на рис. 33. При увеличении температуры или времени диффузии кривая распределения концентрации 1—2 будет сдвигаться вправо и становиться более пологой. Это означает, что *p-n*-переход образуется: глубже, а градиент концентраций $N_p - N_n$ вблизи него будет меньше. Уменьшение градиента концентраций способствует ослаблению напряженности поля и повышению пробивного напряжения *p-n*-перехода. Подложку при высокой концентрации примеси на ее поверх-

Рис. 33. Распределение концентрации примесей при образовании электронно-дырочного перехода диффузией:

$N_D - N_A$ — разность концентраций введенной акцепторной и исходной донорной примеси, δ — глубина; 1 — наибольшая поверхностная концентрация, 2 — полная компенсация примесей, 3 — постоянная концентрация исходной примеси



ности можно использовать как невыпрямляющий контакт, так как в этом случае резко возрастает электропроводность и сопротивление полупроводника становится соизмеримым сопротивлению металла.

Скорость диффузии зависит от температуры. Чем выше температура, тем с большей энергией и скоростью движутся атомы диффузанта в кристаллической решетке полупроводника. В то же время повышение температуры снижает подвижность и время жизни неосновных носителей заряда в полупроводнике.

Коэффициенты диффузии различных веществ при одинаковых условиях существенно отличаются друг от друга. Так, при 1200°C коэффициент диффузии алюминия в кремнии в 10 раз больше коэффициента диффузии бора, который примерно равен коэффициенту диффузии фосфора.

Обычно диффузию проводят в зоне термической установки при температуре $1200\text{--}1250^\circ\text{C}$, допустимое отклонение составляет $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и даже меньше. Поддержание температуры с такой высокой точностью обусловлено значительной зависимостью влияния ее изменения на изменение диффузионного распределения примесей в полупроводнике. Если процесс диффузии не ограничивать во времени, он будет продолжаться до тех пор, пока во всем объеме полупроводника не станет одинаковой концентрация примеси. Учитывая тепловую инерционность, процесс прекращают, понижая температуру задолго до того, как будет достигнуто равномерное распределение атомов примеси во всем объеме полупроводника.

Основным недостатком термической диффузии является высокая температура, при которой в кристаллическую решетку полупроводника одновременно с атомами диффузанта попадают атомы других примесей (загрязнения) и в ней происходит перемещение дефектов, что уменьшает время жизни неосновных носителей. Этих недостатков лишена ионно-лучевая диффузия, так называемая ионная имплантация.

Эпитаксия — это ориентированное наращивание из газовой фазы поверхностного слоя (пленки) с более упорядоченным расположением атомов, чем при нанесении другими способами. Термин эпитаксия образован от греческих слов "эпи", означающего "на", и "таксис", означающего "располагать в порядке". Существенное влияние на рост эпитаксиального слоя оказывает температура. Монокристаллический слой может образоваться только, если температура подложки выше так называемой эпитаксиальной критической температуры. Если температура подложки будет ниже

эпитаксиальной критической, образуется поликристаллический слой. Эпитаксиальный слой образуется в две стадии.

На первой стадии при соприкосновении атомов наращиваемого вещества с атомами подложки и ранее осажденного слоя происходит миграция мелких зародышей (зерен), приводящая к их переориентации, слиянию и поглощению большими, уже ориентированными зернами. При этом кристаллизационный осажденный слой представляет собой отдельно расположенные ориентированные зерна.

На второй стадии эти зерна срастаются между собой и с вновь осаждаемыми в сплошной слой и одновременно рекристаллизуются. При этом действуют силы поверхностного натяжения атомов зерен, стремящиеся стянуть их скопления в компактное образование, и силы поверхностного натяжения атомов подложки, противодействующие стягиванию. В первый момент силы поверхностного натяжения атомов подложки превышают силы поверхностного натяжения атомов зерен осажденного вещества.

По мере роста скоплений и достижения некоторого критического размера зерен изменяется соотношение этих сил и при возникновении зародыша новой фазы с кристаллической структурой, свойственной осаждаемому веществу, сила поверхностного натяжения его атомов становится больше силы поверхностного натяжения атомов подложки. В этот момент зародыши-зерна срастаются. При несовпадении кристаллографических направлений соседних зерен возникают дефекты решетки, затрудняющие получение сплошных монокристаллических слоев.

После образования слоя, полностью закрывающего подложку, новые зародыши образуются на поверхности осажденного слоя, и дальнейший рост кристаллической структуры зависит не от развития эпитаксии, а от автоэпитаксии, т.е. рост идет вне влияния сил поверхностного натяжения подложки.

На качество эпитаксиальных слоев кроме температуры оказывают влияние скорость осаждения вещества, степень загрязнения подложки, ее ориентация, совершенство кристаллической решетки, т.е. факторы, способствующие образованию совершенной структуры.

Одним из направлений совершенствования структуры эпитаксиальных слоев может быть реотаксия — метод, при котором рост слоя осаждаемого вещества происходит независимо от качества подложки. Для этого подложку покрывают слоем расплавленного вещества (например, стеклоэмали) толщиной в несколько тысяч нанометров. При наращивании какого-либо вещества на жидкой поверхности образуется кристаллический слой с крупными, четко ориентированными монокристаллами, лишенный дефектов подложки. Для выполнения реотаксии необходимо пассивное вещество, отвечающее определенным требованиям: оно должно быть жидким; иметь малое давление паров при температуре осаждения; заданный КТР; не вступать в химическую реакцию с осажденным веществом, но в то же время быть с ним поверхностно-активным и не растворяться в нем. Вещество, в полной мере отвечающее предъявленным требованиям, пока не найдено.

Нанесение тонких металлических пленок выполняется термическим вакуумным напылением (испарением и конденсацией), ионным и магнетронным распылением и др. При термическом напылении

вещество испаряется при нагревании. По мере повышения температуры кинетическая энергия его частиц (атомов и молекул) возрастает и становится достаточной для того, чтобы они оторвались от поверхности и распределились в окружающем пространстве. При этом увеличивается и количество частиц, оторвавшихся от поверхности вещества. Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Но есть вещества, переходящие в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс перехода называют с у б л и м а ц и е й. Веществами, способными сублимировать, являются кадмий, цинк, имеющие соответственно температуры плавления 321 и 419°С и сублимации 264 и 343°С.

Следует отметить, что температурой испарения вещества называют температуру, при которой давление его паров над поверхностью составляет 1,3 Па. Скорость испарения вещества определяется его количеством, испаряемым с единицы площади в секунду. Для повышения скорости испарения и уменьшения вредного влияния остаточных газов на свойства осаждаемой пленки испаряемые вещества нагревают в рабочей камере вакуумной установки выше их температуры испарения. При большой скорости испарения давление паров над испарителем может повыситься до такой степени, что к подложкам пойдет не поток пара, а мельчайшие капельки вещества, которые, конденсируясь, образуют пленку низкого качества.

Условия конденсации существенно зависят от температуры подложки и так называемой критической температуры, при превышении которой атомы осаждаемого вещества отражаются от подложки, т.е. пленка не образуется. При плотности потока частиц меньше критической конденсации вещества не происходит. Критическая температура и критическая плотность взаимосвязаны: критическая температура данного вещества тем выше, чем выше плотность его атомного пучка (потока).

Взаимосвязь между критической температурой подложки и критической плотностью потока частиц подтверждена экспериментом, согласно которому атомы испаряемого вещества, попавшие на подложку, начинают мигрировать по ее поверхности. Подвижность их зависит от энергии, температуры подложки и состояния ее поверхности. Атомы, находящиеся на поверхности подложки, могут реиспаряться (отражаться) или образовывать центры конденсации. При повышении температуры подложки вероятность отскока атомов от ее поверхности повышается. Частицы, образующие центры кристаллизации, менее подвижны и вероятность их реиспарения мала. При повышении плотности тока отскачившие атомы захватываются вновь подлетающими, соединяются с ними и осаждаются на поверхность подложки, образуя новые центры конденсации.

Как уже отмечалось, на условия конденсации и структуру образовавшейся пленки влияют имеющиеся в рабочем объеме установки молекулы остаточных газов, в основном молекулы паров воды. Реагируя с напыленным металлом, молекулы паров воды окисляют его, образуя тонкий оксидный слой. Для сравнительно легко окисляемых металлов (хрома, железа) этот слой создает условия хорошей адгезии напыляемой пленки к подложке. Такие плохо окисляемые металлы, как золото и серебро, имеют

слабую адгезию, поэтому их обычно осаждают на подслон другого металла с лучшей адгезией.

Следует знать, что эксплуатировать вакуумную установку с заметным натеканием воздуха в рабочую камеру нельзя даже в том случае, если вакуумные насосы способны обеспечить требуемую степень разрежения, так как создаются условия для попадания неконтролируемых загрязнений в рабочий объем.

Размером зерен пленки определяются ее структура и электрические свойства, зависящие также от природы осаждаемого вещества, температуры, состояния поверхности подложки и скорости напыления. Существует критический размер (радиус) зерен, при превышении которого начинается устойчивый рост пленки. Критический радиус зерен обратно пропорционален температуре плавления металла. Так, металлы, имеющие высокую температуру плавления (вольфрам, молибден, тантал, платина), образуют мелкозернистую структуру, а низкую (кадмий, магний, цинк) — крупнозернистую.

При повышении температуры подложки критический размер зерен увеличивается, а при росте скорости напыления уменьшается, и пленка приобретает непрерывную структуру. Поэтому для получения пленки мелкозернистой структуры желательно проводить процесс при низкой температуре и высокой скорости напыления.

Напылением можно получать пленку четырех структур: аморфную, не имеющую кристаллической решетки; мелко- и крупнозернистую с кристаллами, имеющими соответственно размеры менее 10 нм и более 100 нм; монокристаллическую, вся поверхность которой представляет собой сплошную кристаллическую решетку.

§ 14. Способы теплопередачи

Переход теплоты из одной части пространства в другую, от одного тела к другому или внутри тела от одной его части к другой при наличии разности температур называют **теплопередачей** или **теплообменом**. Вакуумно-термические и термические процессы полупроводникового производства основаны на трех известных способах передачи теплоты: теплопроводности, конвекции и излучении (лучеиспускании, радиации).

Теплопроводность — это процесс передачи теплоты от одной части тела к другой или между двумя соприкасающимися телами. Физически механизмы теплопроводности в газах, жидкостях и твердых телах несколько отличаются. В газах передача теплоты происходит вследствие хаотического свободного движения молекул. В твердых телах она осуществляется за счет колебаний атомов кристаллической решетки, а в металлах — еще и как результат движения свободных электронов. В жидкостях передача теплоты происходит упругими волнами, распространяющимися в ней и несущими энергию.

Конвекция — это теплопередача за счет движения небольших объемов жидкой или газовой среды. В твердых телах она, конечно, невозможна.

Излучение обусловлено распространением электромагнитных

колебаний через прозрачную для них среду. При этом теплота нагревателя переходит в лучистую энергию, которая, попадая на другие тела, вновь превращается в тепловую. Радиационная передача теплоты находит применение в печах с лампами накаливания или другими источниками интенсивного излучения, которое направляется непосредственно на обрабатываемые объекты. Нагреватели обычно экранируют. Если поверхности экранов имеют высокий коэффициент отражения, почти вся лучистая энергия идет на обогрев.

Рассмотрим в качестве примера процесс передачи теплоты в камере нагрева термической установки, предназначенной для проведения диффузии (рис. 34). Рабочим пространством установки служит кварцевая труба 5, вокруг которой расположен нагреватель 4. Между нагревателем и трубой имеется воздушный промежуток. Снаружи нагреватель изолирован материалом низкой теплопроводности — теплоизоляцией 3 и закрыт металлическим кожухом 1. В кварцевую трубу устанавливают лодочки 2 с полупроводниковыми пластинами. Технологической средой обычно является газ (азот, водород, аргон, кислород).

При включении нагревателя тепловая энергия через воздушный промежуток передается кварцевой трубе. Однако роль конвекции здесь незначительна, так как воздушная среда практически неподвижна из-за наличия слоя теплоизоляции 3 между трубой и кожухом. Поэтому в основном теплопередача осуществляется теплопроводностью и излучением. Так как теплота распространяется вдоль кварцевой трубы, которая обладает значительной массой и теплоемкостью, разность температур на участке определенной протяженности сглаживается и создается рабочая зона с постоянной температурой. Разогретая кварцевая труба становится источником тепловой энергии. Кроме того, кварц прозрачен для излучения.

Таким образом, теплота от нагревателя, пройдя воздушный промежуток, кварцевые стенки трубы и технологическую (газовую) среду, передается пластинам и нагревает их, т.е. нагрев осуществляется тремя способами: вследствие теплопроводности от лодочки и газовой среды к пластинам; излучением нагревателя и кварцевой трубы; конвективным движением газового потока в рабочем пространстве.

Теплоизоляция предназначена для уменьшения потерь теплоты. Хотя

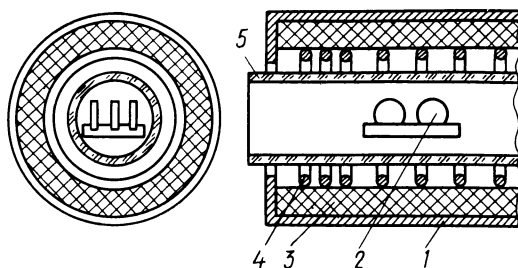


Рис. 34. Камера нагрева термической установки:
1 — металлический кожух, 2 — лодочка с полупроводниковыми пластинами, 3 — теплоизоляция, 4 — нагреватель, 5 — кварцевая труба

подобные теплотери неизбежны, следует стремиться к тому, чтобы они были минимальными. Для этого вокруг нагревателя устанавливают специальные металлические экраны с зеркальной поверхностью, отражающие тепловое излучение в сторону нагреваемых изделий.

Иногда некоторые элементы термических установок необходимо охлаждать. Так, для снижения температуры обработанных изделий охлаждают проточной водопроводной водой или воздушным обдувом выходную часть трубы конвейерной печи или для сохранения резиновых прокладок — нижнюю зону колпаковых печей.

§ 15. Классификация технологических процессов и оборудования

Зонную очистку полупроводников, вытягивание монокристаллов, сплавление, диффузию, создание невыпрямляющих контактов, выращивание различных пленок, соединение стекла и керамики с металлом, сварку, пайку и лужение выполняют на специальном оборудовании при температуре, значительно превышающей окружающую.

Различные пленки получают в вакуумных напылительных установках, камерах катодного распыления, а также аппаратуре для эпитаксии и т.д. При работе с электронными и ионными пучками применяют электронно-ионно-лучевые установки. Наконец, для изготовления корпусов полупроводниковых приборов и микросхем используют газовые и вакуумные печи (для отжига металлических деталей), конвейерные печи и полуавтоматы (для получения спаев стекла с металлом), колпаковые и конвейерные газовые печи (для пайки металла с металлом и керамикой), а также различные устройства для горячего лужения выводов.

В зависимости от используемой технологической (рабочей) среды основные процессы изготовления полупроводниковых приборов можно разделить на термические и вакуумно-термические. Кроме того, их классифицируют по назначению. К термическим процессам относят выращивание монокристаллов, зонную плавку, сплавление, диффузию, термоокисление, наращивание эпитаксиальных пленок, сварку, пайку и лужение, а к вакуумно-термическим — процессы элионной технологии, вакуумного осаждения и катодного распыления различных материалов. Некоторые процессы (выращивание монокристаллов, сплавление) могут выполняться тем и другим способами.

В зависимости от рабочей температуры эти процессы бывают низкотемпературные — до 900°С (при производстве германиевых приборов) и высокотемпературные — до 1300°С (при производстве кремниевых приборов). Соответственно технологическое оборудование подразделяют на низко- и высокотемпературное.

По принципу работы оборудование может быть периодического (вакуумные напылительные установки) и непрерывного (конвейерные печи) действия.

По способу регулирования температуры различают оборудование с автоматической системой поддержания температуры на заданном уровне, а также с программным и ручным управлением.

По конструкции различают оборудование с вертикальным и горизонтальным расположением рабочего объема, который может быть выполнен в виде одного или нескольких каналов или камер.

В оборудовании для термических и вакуумно-термических процессов используют несколько типов нагревателей. Наиболее распространены резистивные нагреватели сопротивления: прямонакальные, спиральные, стержневые, силитовые и другие, которые применяют в печах для сплавления, диффузии и в вакуумных напылительных установках. Индукционные катушки высокой частоты оказались особенно удобны в установках зонной плавки, выращивания монокристаллов и получения пленок. В новейшем термическом оборудовании применяют радиационные нагреватели (инфракрасные лампы накаливания), отличающиеся малой инерционностью и небольшими габаритами.

По способу нагрева оборудование разделяют на электрические термические установки сопротивления (прямонакальные и косвенного нагрева) и с использованием электрофизических методов нагрева (электронно-лучевые, лазерные и плазменные).

По способу передачи теплоты нагреваемому объекту оборудование разделяют на установки, в которых нагрев осуществляется только излучением (вакуумные термические установки сопротивления, не имеющие контакта нагревателя и изделия), излучением и частично конвекцией (диффузионные термические установки сопротивления) и, наконец, излучением, конвекцией и теплопроводностью (гальванические или другие ванны с электрообогревом).

При электронно-лучевой обработке нагрев происходит вследствие преобразования кинетической энергии электронов в тепловую энергию при торможении их в твердом теле, а при лазерной — в результате воздействия электромагнитных волн на вещество. Таким образом, при обработке электронным или лазерным пучком тепловая энергия образуется только при воздействии его на вещество и, следовательно, ее передача осуществляется теплопроводностью. При плазменной обработке теплота выделяется при ионизации газа и передается нагреваемому телу излучением и теплопроводностью.

§ 16. Автоматические системы регулирования и поддержания температуры

Системой автоматического регулирования называют устройство, управляющее по определенному закону одним или несколькими параметрами технологического процесса. В термических установках производства полупроводниковых приборов и микросхем применяют автоматические электронные системы стабилизации и программного регулирования температуры. Системы стабилизации поддерживают заданную температуру на постоянном уровне или в допустимых пределах. Системы программного регулирования автоматически воспроизводят с определенной точностью заданный закон изменения температуры.

Системы автоматического регулирования температуры обычно разрабатываются по единой структурной схеме (рис. 35) и состоят из задатчика

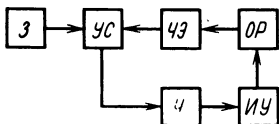


Рис. 35. Структурная схема системы автоматического регулирования

З, устройства сравнения УС, чувствительного элемента (датчика) ЧЭ, объекта регулирования ОР, исполнительного устройства ИУ и усилителя У. Задатчиком (уставкой) устанавливают в термической установке требуемый уровень температуры, который должен поддерживаться системой автоматически. Чувствительный элемент (например, термоэлектрический преобразователь — термопара), находящийся в термической установке — объекте регулирования, измеряет действительное значение температуры и подает сигнал в устройство сравнения. Этот сигнал сравнивается с заданным и в результате вырабатывается сигнал рассогласования. Усилитель преобразует сигнал рассогласования в управляющий сигнал требуемого вида и мощности, который воздействует на исполнительное устройство, регулирующее подачу электроэнергии. При этом система приходит в равновесие и сигнал рассогласования становится равным нулю.

Температура термической установки прямо пропорциональна подводимой мощности питания. Плавно изменяя подводимую мощность, поддерживают постоянную в любой момент времени температуру. При ступенчатом изменении подводимой мощности температура лишь в среднем за какой-то период времени может быть пропорциональна ей.

Точность регулирования температуры обеспечивается охватом блоков питания отрицательной обратной связью по напряжению, которая способствует постоянству температуры установки, так как основные внешние колебания сетевого напряжения стабилизируются контуром усилителя. Кроме того, точность регулирования температуры зависит от используемого блока питания. Чем чаще включается установка, тем выше должна быть точность регулирования. Однако частота включения установки ограничивается допустимым режимом работы коммутационной аппаратуры. При использовании бесконтактных блоков питания на магнитных усилителях или тиристорах частота включения установки не ограничивается.

Так как при разогреве нагревательных элементов из молибдена, дислицида молибдена или вольфрама их сопротивление возрастает в десятки раз, чтобы не перегружать источник питания по току, установку разогревают при пониженном напряжении, постепенно повышая его по мере роста температуры и сопротивления нагревателей. Блоки питания автоматически поддерживают требуемый режим разогрева. Блоки питания на тиристорах характеризуются высокими быстродействием и кпд, малыми габаритами и низкой стоимостью, а на магнитных усилителях — высокой надежностью.

Для изменения мощности термических установок чаще других используют двухпозиционное регулирование, при котором они периодически включаются на номинальную мощность, а затем полностью отключаются. Изменяя время включения и отключения, можно плавно в широких пределах изменять среднюю мощность, а следовательно, температуру нагрева. Иногда применяют трехпозиционное регулирование, при котором допол-

нительная ступень позволяет включать установку на полную или частичную мощность. Широкое использование позиционного регулирования объясняется его простотой. Но оно обладает низкой точностью поддержания заданной температуры и поэтому не может применяться, например, в диффузионных термических установках, точность поддержания температуры в которых должна быть $\pm 0,5^\circ\text{C}$ по длине канала 600 мм.

По принципу действия системы регулирования бывают непрерывные и дискретные (релейные и импульсные). Каждый элемент систем регулирования непрерывного действия воздействует на другие постоянно, т.е. выходной сигнал является непрерывной функцией рассогласования на выходе регулятора. В релейных системах регулирования положение исполнительного органа зависит не от значения сигнала рассогласования, а от его знака. В импульсных системах выходной сигнал регулятора представляет собой последовательный ряд импульсов, амплитуда, длительность или частота которых зависят от сигнала рассогласования.

Регуляторы, используемые в системах автоматического регулирования, работают по одному из четырех основных законов: пропорциональному (П), интегральному (И), пропорционально-интегральному (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД).

Регуляторы пропорционального действия (П-регуляторы) имеют жесткую связь между входным и выходным сигналами, т.е. между отклонением температуры и приращением подводимой к установке мощности (ΔP). Каждому значению отклонения температуры (рассогласования Δt) соответствует единственное значение подводимой мощности. Идеальный П-регулятор не имеет инерции. При скачкообразном изменении температуры Δt в момент времени τ_1 мгновенно возникает соответствующее изменение мощности, как это видно из динамической характеристики (рис. 36, а), которое соответствует произведению коэффициента усиления K_p на рассогласование Δt . Единственным настраиваемым параметром П-регуляторов является коэффициент усиления K_p .

Реальные П-регуляторы обладают неравномерностью регулирования (статизмом) тем меньшей, чем больше коэффициент усиления. Уменьшить неравномерность регулирования увеличением коэффициента усиления не всегда удастся, так как из-за инерционности установки и датчика регулятор получает сигнал о наличии возмущающего воздействия с запаздыванием и с опозданием формируется компенсирующее воздействие. В результате сигнал о возмущающем воздействии может изменить не только свое значение, но и знак, что вызывает колебательный режим при большом усилении регулятора.

Жесткая связь между входным и выходным сигналами П-регуляторов при работе установок, имеющих резистивный нагрев, с переменным потреблением мощности не обеспечивает поддержания температуры на заданном уровне, что является их недостатком.

Регуляторы интегрального действия (И-регуляторы) не имеют определенной зависимости между отклонением значения регулируемого параметра и его выходного значения. Другими словами, можно сказать, что И-регуляторы изменяют подводимую мощность со скоростью, пропорциональной отклонению регулируемой температуры от

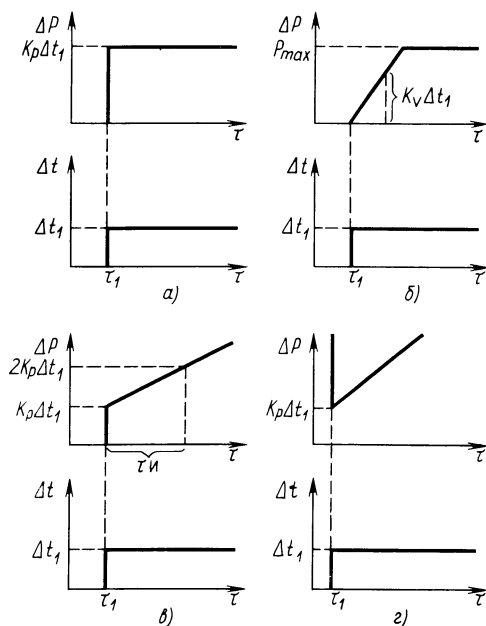


Рис. 36. Динамические характеристики П-регулятора (а), И-регулятора (б), ПИ-регулятора (в) и ПИД-регулятора (г)

заданной. Из динамической характеристики И-регулятора (рис. 36, б) следует, что пока происходит изменение температуры Δt_1 , выходной сигнал увеличивается и через единицу времени будет равен произведению температуры рассогласования Δt на коэффициент усиления по скорости K_V , являющийся единственным параметром настройки регуляторов этого типа.

Основным преимуществом И-регуляторов по сравнению с П-регуляторами является то, что они не обладают неравномерностью регулирования, так как при наличии даже малого отклонения температуры непрерывно изменяют мощность. Однако запас устойчивости систем с И-регуляторами значительно меньше, а переходные процессы имеют, как правило, колебательный характер. Поэтому в термических установках с резистивными нагревателями И-регуляторы из-за низких динамических свойств не применяют.

Регуляторы пропорционально-интегрального действия — изодромные (ПИ-регуляторы) совмещают П- и И-регулирующие воздействия. Параметрами настройки этих регуляторов являются коэффициенты усиления по мощности K_P и по скорости K_V . Из динамической характеристики ПИ-регулятора (рис. 36, в) видно, что при постоянной температуре рассогласования Δt_1 через время изодрома (удвоения), равное $\tau_{и}$, входной сигнал становится пропорциональным мощности. Время изодрома характеризует степень введения в закон регулирования интегрального воздействия. Интегральная часть регулятора делает связь между

температурой и мощностью гибкой, изменяющейся во времени в зависимости от значения и длительности сигнала рассогласования.

При правильной настройке ПИ-регулятор обладает достоинствами как П-, так и И-регулятора. Однако настройка ПИ-регулятора довольно трудоемка и при этом важно обеспечить приемлемое время регулирования, колебательность переходного процесса и динамическое отклонение мощности.

Регуляторы пропорционально-интегрально-дифференциального действия — изодромные с предварением (ПИД-регуляторы, называемые также РЕПИД) изменяют мощность пропорционально отклонению регулируемого параметра, его интегралу, а также скорости изменения и имеют три параметра настройки: коэффициент усиления K_p , время предварения и время издрома.

Динамическая характеристика ПИД-регулятора, представляющего собой систему из трех параллельно включенных звеньев — пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего, показана на рис. 36, з. При введении воздействия регулятор учитывает тенденцию в отклонении, оценивает значимость вносимого возмущения до возникновения большого рассогласования и в соответствии с этим заранее выполняет регулирование, что способствует уменьшению динамического отклонения регулируемого параметра, снижению колебательности системы и времени регулирования.

Регуляторы этого типа обеспечивают высокую точность регулирования, так как не допускают остаточной неравномерности, обладают наименьшим динамическим отклонением и имеют минимальное время регулирования. Их применяют в термических диффузионных установках при особенно высоких требованиях к точности поддержания заданной температуры на определенной длине рабочего канала.

Контрольные вопросы

1. Что называют теплообменом и какие способы передачи теплоты вы знаете?
2. Какими способами передается теплота к изделиям в термических установках?
3. По каким признакам классифицируют термическое оборудование для производства изделий микроэлектроники?
4. Что такое автоматическое регулирование температуры и для чего его выполняют?
5. Каков принцип построения систем автоматического регулирования температуры?
6. Что такое позиционное регулирование?
7. Каковы достоинства и недостатки П-, ПИ- и ПИД-регуляторов?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДИФфуЗИЕЙ ПРИМЕСИ

§ 17. Общие сведения

При производстве полупроводниковых приборов диффузию используют для введения в полупроводник той или иной примеси и проводят при постоянных температуре и поверхностной концентрации примеси, регулируя процесс во времени. Если при введении примеси образуются носители заряда, знак которых противоположен типу электропроводности исходного полупроводника (например, дырки в *n*-германии), в нем образуется электронно-дырочный переход, который располагается в плоскости, где концентрации примесей обоих типов будут равны.

Параметры диффузионных приборов в значительной мере определяются глубиной залегания электронно-дырочных переходов, которая, в свою очередь, зависит от времени и температуры диффузии. Задаваясь необходимой глубиной залегания, зная коэффициент диффузии и поверхностную концентрацию примеси, можно рассчитать режим диффузионного процесса. Зависимость глубины залегания перехода от времени (при постоянной температуре диффузии) можно также определить экспериментально.

Рассмотрим особенности конструкции кристаллов с диффузионными *p-n*-переходами высокочастотных планарных германиевого (рис. 37, *а*) и кремниевое (рис. 37, *б*) транзисторов.

В германиевом транзисторе (рис. 37, *а*) коллекторной областью кристалла является германий электронного типа электропроводности. Базовую область (дырочного типа электропроводности) создают диффузией галлия, а эмиттерную — диффузией мышьяка. Таким образом, транзистор имеет *p-p-n*-структуру. Невыпрямляющие (омические) контакты к базе и эмиттеру получают вакуумным напылением и последующим вплавлением трехкомпонентного сплава серебро — золото — сурьма. К этим контактам термокомпрессией присоединяют электродные выводы из сплава золото — серебро (микропроволока ϕ 15 мкм). Поверхность кристалла защищают пленкой диоксида кремния. В плане (вид сверху) контактные площадки эмиттерной и базовой области имеют прямоугольную форму.

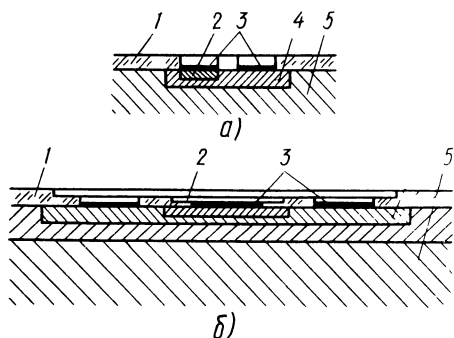


Рис. 37. Разрезы кристаллов высокочастотных планарных транзисторов с электронно-дырочными переходами, полученными диффузией:

а — германиевого, *б* — кремниевое; 1 — пленка диоксида кремния, 2 — эмиттер, 3 — невыпрямляющие контакты, 4 — база, 5 — коллектор (исходный полупроводник)

В кремниевом транзисторе (рис. 37, б) исходным материалом (коллекторной областью) служит кремний электронного типа электропроводности. Чтобы уменьшить сопротивление коллекторной области, кремний легируют фосфором, в результате чего получается слой n^+ -типа. Базу и эмиттер создают диффузией бора и фосфора. В результате транзистор имеет $n-p^+-n^+$ -структуру. Омические контакты к базе и эмиттеру получают вакуумным напылением и вплавлением алюминия. К этим контактам термокомпрессией присоединяют электродные выводы из золотой микропроволоки ϕ 40 мкм. Поверхность кристалла защищают слоем диоксида кремния. В плане контактные площадки эмиттерной области имеют круглую, а базовой — овальную форму.

Известно несколько методов проведения диффузии. При встречной диффузии примесь проникает в полупроводниковую пластину с обеих сторон, а при одновременной — сразу вводят две разные примеси. Последовательную диффузию выполняют в две стадии, что делает процесс более гибким (например, можно использовать донорную и акцепторную примеси с близкими коэффициентами диффузии, регулируя глубину залегания диффузионных слоев изменением режима процесса при переходе от его первой стадии ко второй).

Обычно при диффузии примесь в полупроводник вводят в два этапа. Сначала вблизи поверхности пластины создают обогащенный диффузионный слой определенной, сравнительно большой, концентрации примеси и соответственно малого удельного сопротивления (загонка диффузанта). Этот процесс осуществляют термической обработкой полупроводника в парах примеси (чаще всего из потока газа - носителя).

Очищенный газ (азот, аргон, гелий), проходя над разогретым диффузантом, переносит в зону диффузии его пары, и они, частично осаждаясь на полупроводниковых пластинах, диффундируют в них. Остальная часть примеси выбрасывается из системы вместе с газом. Процесс продолжается несколько часов и ведется в двухзонной печи, рабочим каналом которой является труба из чистого высококачественного кварца, обладающего способностью длительное время выдерживать нагрев до 1300°C и не служить источником каких-либо загрязнений.

После проверки удельного сопротивления пластин приступают ко второму этапу — переводению примеси в глубь полупроводника (разгонка диффузанта). Эту операцию обычно проводят в однозонной печи, рабочим каналом которой является кварцевая или керамическая труба. Керамика по сравнению с кварцем обладает большей термостойкостью. На первом этапе диффузии керамические трубы непригодны, так как их поверхность может насыщаться парами диффузанта, что в дальнейшем приводит к браку кристаллов; очистка (промывка) керамических труб не дает надежных результатов. Второй этап диффузии может длиться несколько десятков часов.

§ 18. Технологические методы нанесения оксидных пленок

При изготовлении германиевых и кремниевых планарных и планарно-эпитаксиальных приборов на поверхности пластин одновременно с диффузией создают диэлектрическую пленку диоксида кремния SiO_2 . Пленка

диоксида кремния служит для маскировки отдельных участков кристалла при проведении локальной диффузии, пассивирования и стабилизации поверхности полупроводника, а также изоляции активных и получения пассивных компонентов приборов и микросхем.

Пленка диоксида кремния обладает сравнительно высокой температуростойкостью, химической инертностью, высокой диэлектрической прочностью и механической совместимостью с полупроводниковыми материалами. Кроме того, имея небольшой коэффициент термического расширения, она достаточно эластична. Недостаток пленки — пористость, снижающая эффективность пассивации и ведущая к нестабильности параметров приборов.

Пленку диоксида кремния на пластинах кремния получают несколькими методами, основными из которых являются: окисление исходного кремния и осаждение готового оксида. Первый метод основан на химическом окислении поверхности полупроводника при высокой температуре и пригоден лишь для кремниевых приборов. Что же касается осаждения готового оксида, то его можно выполнять пиролизом, испарением в вакууме или реактивным (катодным) распылением на различных полупроводниковых материалах.

Химическое окисление кремниевых пластин обычно ведут в две стадии: сначала во влажном, а затем в сухом кислороде. Увлажнение кислорода способствует быстрому росту пленки, а последующая обработка сухим газом обеспечивает снижение ее пористости. Толщина начального слоя 1–1,5 мкм, что обеспечивается поддержанием на заданном уровне рабочей температуры (1200–1300°С), расхода кислорода и температуры воды в увлажнителе.

При окислении пластин кремния во влажном и сухом кислороде (рис. 38, а) пропускают кислород через увлажнитель 4, в котором находится дистиллированная вода, подогреваемая электроплиткой 5, и подают в рабочий канал термической установки 3. Содержание влаги в потоке

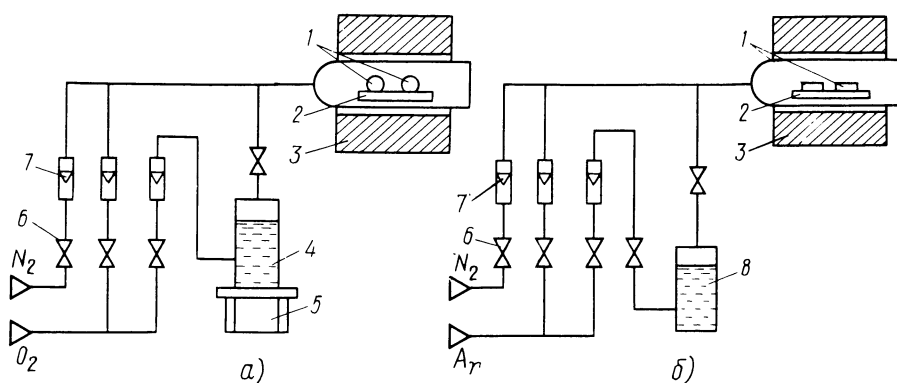
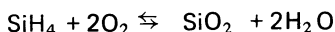


Рис. 38. Схемы установок для получения пленок диоксида кремния: а — на кремнии во влажном и сухом кислороде, б — на германии пиролизом этилсиликата; 1 — полупроводниковые пластины, 2 — кассета, 3 — термическая установка, 4 — увлажнитель, 5 — электроплитка, 6 — вентиль, 7 — ротаметр, 8 — питатель с этилсиликатом

газа определяется температурой воды и скоростью потока, которую устанавливают по ротаметру 7. Получаемая пленка диоксида кремния имеет много дефектов (в основном пор), которые устраняются последующей термообработкой в сухом кислороде, подаваемом непосредственно в термоустановку (в обход увлажнителя). Окончательная толщина пленки 0,3–0,4 мкм.

Осаждение диоксида кремния (готового окисла) на пластины германия проводят пиролитическим разложением силана (тетраэтоксисилана $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ или сокращенно — этилсиликата) на установке, показанной на рис. 38, б. Кассету 2 с пластинами 1 помещают в кварцевую трубу, в которую после предварительной продувки аргоном подают пары этилсиликата. Носителем паров также является аргон. Разложение этилсиликата с осаждением пленки диоксида кремния на германии обычно происходит при 650–700°C. В течение 80 мин толщина пленки достигает 0,15 мкм. Скорость ее осаждения пропорциональна времени проведения процесса при постоянной температуре.

Так как пленку диоксида кремния получают при сравнительно высоких температурах, электрофизические свойства полупроводников могут изменяться из-за миграции легирующих примесей. Чтобы устранить это явление, целесообразно наносить эту пленку при низких температурах. Осаждение SiO_2 в этом случае происходит при реакции окисления газа силана:



При температуре подложек (пластин полупроводника) около 300°C удается получать оксидные пленки высокого качества.

Термическая установка для низкотемпературного осаждения диоксида кремния (рис. 39) состоит из реактора, привода рабочего столика, вакуумной и газовой систем, а также системы терморегулирования.

Реактор 1 смонтирован на металлическом каркасе и сверху закрыт стеклянным колпаком, уплотненным на фланце прокладкой. Внутри колпака размещается нагреватель 2 — керамическая плитка, закрытая сверху металлическим корпусом, а снизу — теплоизоляционной вставкой. Корпус нагревателя опирается на фторопластовую прокладку, лежащую на основании реактора.

Подложки помещают на вращающийся рабочий столик 3, приводимый в движение специальным приводом 4, состоящим из электродвигателя постоянного тока, муфты, двухступенчатого червячного редуктора и конической шестеренчатой передачи. Вертикальный вал столика вращается в специальной опоре, обеспечивающей вакуумную плотность реактора. Опора и подшипники расположены в отдельном корпусе.

Перед осаждением пленки реактор откачивают с помощью вакуумной системы 6 (насос, электромагнитные клапаны, вентили, трубопроводы и другая арматура), а затем подают в него смесь силана, кислорода и аргона. В результате окисления силана образуется диоксид кремния, который осаждается на пластинах полупроводника в виде пленки.

Рабочий столик охлаждается струей азота через корпус подшипников.

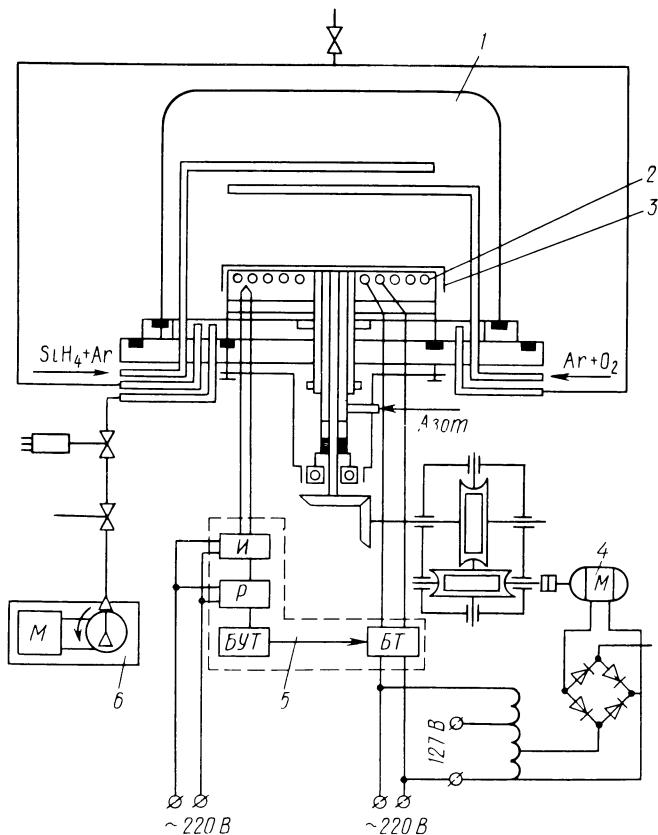


Рис. 39. Термическая установка для низкотемпературного осаждения диоксида кремния на полупроводниковые пластины:
1 — реактор, 2 — нагреватель, 3 — рабочий столик, 4 — привод, 5, 6 — системы терморегулирования и вакуумная

Семь штуцеров в корпусе служат для подачи и удаления газа, откачки колпака, ввода и слива воды. Температура нагревателя поддерживается на заданном уровне системой терморегулирования 5.

Эту установку можно также использовать для одновременного осаждения пленки и легирования полупроводника. Техническая характеристика установки приведена ниже.

Количество загружаемых пластин диаметром 60 мм	8—10
Диапазон рабочей температуры, °C	300—600
Время выхода нагревателя на рабочий режим, мин	30
Точность поддержания температуры (в течение 2 ч), °C	±2
Точность воспроизведения температуры при одинаковых положениях органов настройки, °C	±2
Предельное давление в рабочем объеме, Па	$6,6 \cdot 10^2$
Потребляемая мощность, кВт	2,5
Габаритные размеры, мм	600×600×1500

Кроме пленок диоксида кремния в полупроводниковой электронике используют пленки оксидов алюминия Al_2O_3 , иттрия Y_2O_3 , европия Eu_2O_3 , а также на основе фосфороборосиликатных стекол, нитрида кремния Si_3N_4 , фторидов кальция CaF_2 и магния MgF_2 и органических диэлектриков (например, полипарааксисилена ППК). Среди них наибольший интерес представляют пленки оксида алюминия и нитрида кремния.

Пленки оксида алюминия имеют хорошую адгезию, высокую теплопроводность, КТР, близкий к КТР полупроводников, не пористы и прочны на разрыв. По сравнению с пленками диоксида кремния они отличаются более высокой диэлектрической проницаемостью и обладают лучшими маскирующими свойствами при проведении процессов диффузии, а также имеют более совершенную структуру (отсутствие пор), на что указывают их влагостойкость и стабильность во времени. Кроме того, пленки оксида алюминия слабо растворяются в соляной и азотной кислотах, но хорошо — в фосфорной и в травителях на основе плавиковой кислоты. Наносят эти пленки испарением оксида алюминия энергией электронного луча или электрохимическим анодированием в электролитах, содержащих алюминий.

Пленки нитрида кремния по сравнению с пленками диоксида кремния имеют плотную, без дефектов (раковин и трещин) структуру и хорошие электрические параметры, стабильные даже при высокой температуре. Их удельное электрическое сопротивление 10^{12} Ом·см, диэлектрическая прочность 10^3 В/мкм, а диэлектрическая проницаемость от 3,4 до 12,7. Кроме того, пленки нитрида кремния стойки к действию агрессивных сред: слабо реагируют с растворами на основе плавиковой и других кислот. Исключение составляет горячая ортофосфорная кислота, которая травит пленки нитрида кремния с незначительной скоростью.

Получают пленки нитрида реактивным распылением и пиролизом. Широкому внедрению пленок нитрида кремния в производство препятствуют значительная зависимость их качества от способов и режимов получения и небольшая скорость осаждения (0,0002–0,02 мкм/мин).

§ 19. Технология диффузионных процессов

В настоящее время диффузию проводят: в отпаянной ампуле; в потоке газа-носителя; в замкнутом объеме (бокс-метод); в вакууме; из сосредоточенных (метод окраски) оксидных источников. Рассмотрим первые три метода, как наиболее распространенные.

Диффузия в отпаянной ампуле (рис. 40). Источник примеси (диффузант) 5 и полупроводниковые пластины 3 помещают в кварцевую ампулу 2, которую откачивают или заполняют инертным газом, затем запаивают и помещают в термоустановку 1, снабженную термопарой 4. Диффузант может быть нанесен на поверхность пластин или помещен в ампулу. Процесс проводят при постоянной или изменяющейся температуре.

Этим методом проводят диффузию на германии и кремнии. Нагрев выше 1300°C недопустим, так как кварцевая ампула деформируется. Кроме того, рост давления в ампуле при нагревании может быть причиной ее разрушения.

В качестве источника примеси — диффузанта — служат химические

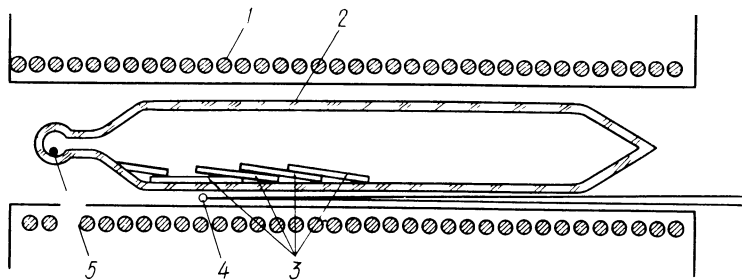


Рис. 40. Диффузия в отпаянной ампуле:

1 — нагреватель термической установки, 2 — кварцевая ампула, 3 — полупроводниковые пластины, 4 — термопара, 5 — диффузант

элементы III или V группы таблицы Д.И. Менделеева либо их соединения, находящиеся в газообразном, жидком или твердом состоянии.

Рассмотрим технологический процесс диффузии мышьяка в германий при изготовлении транзистора, показанного на рис. 37, а. Пять-шесть пластин германия и 0,7–1,2 мг мышьяка помещают в ампулу, как показано на рис. 40. После откачки до давления $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ампулу отпаявают, помещают в печь, нагревают до температуры $(700 \pm 2)^\circ\text{C}$, и выдерживают некоторое время (в зависимости от требуемой глубины диффузии). Чтобы остановить процесс, конденсируют пары мышьяка, охлаждая один из участков стенки ампулы. Затем ампулу извлекают из печи, дают ей остыть, вскрывают и извлекают пластины.

Достоинством этого метода является возможность использования токсичных примесей мышьяка без специальных защитных устройств, а недостатками — большая трудоемкость подготовительных работ, высокая стоимость кварца и невозможность обеспечить чистоту процесса (возможна диффузия побочных примесей).

Д и ф ф у з и я в п о т о к е г а з а - н о с и т е л я (азота или аргона) получила преимущественное применение в производстве полупроводниковых приборов. Этот метод сравнительно дешев (не требуются дорогостоящие ампулы, служащие один раз), производителен (рабочий канал позволяет помещать в него значительно большее количество пластин) и обладает широкими технологическими возможностями (конструкция термического оборудования позволяет более точно регулировать количество подаваемых в рабочий канал диффузанта и газа-носителя).

Диффузия в потоке газа-носителя может осуществляться из твердого, газообразного или жидкого источника как на германии, так и на кремнии. Диффузантом служат элементы III или V группы периодической системы Д.И. Менделеева или их соединения.

Диффузию из твердого диффузанта выполняют в двухзонной термической установке (рис. 41, а), имеющей две нагревательные камеры: источника диффузии 2 и диффузии 3. Во всех термических установках, предназначенных для диффузии в потоке газа-носителя, рабочим каналом 7 служит труба из переплавленного кварца, имеющая на входной стороне шлиф для подачи газа-носителя и газообразного или паров жидкого диффузанта. Рабочий канал расположен в камере нагрева термической уста-

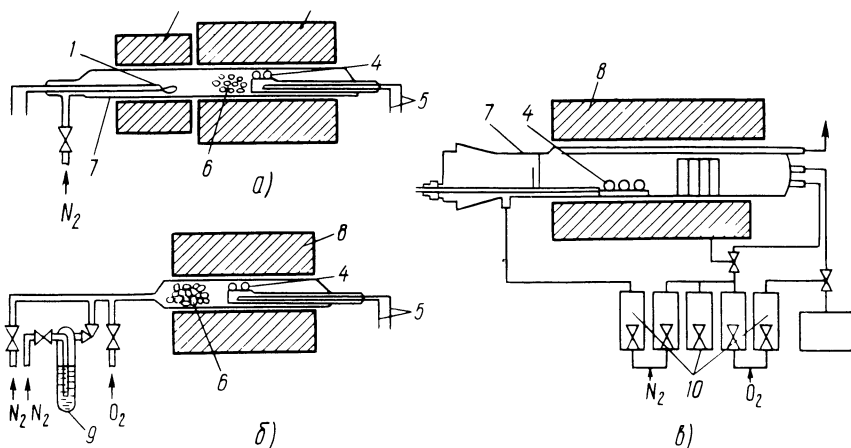


Рис. 41. Диффузия в потоке газа-носителя из источника диффузии:

а — твердого, *б* — жидкого, *в* — газообразного; 1 — твердый диффузонт, 2, 3 — камеры нагрева источника и зоны диффузии, 4 — полупроводниковые пластины в подложке, 5 — термопара, 6 — термостойкая вата, 7 — рабочий канал, 8 — камера нагрева, 9, 10 — питатели (дозаторы) источников жидкого и газообразного диффузентов

новки. Твердый диффузонт, помещенный в камеру 2 источника диффузии, при нагреве испаряется, переносится газом-носителем в камеру 3 диффузии, попадает на полупроводниковые пластины 4 и диффундирует в них. Температуру нагрева диффузанта и полупроводниковых пластин контролируют термопарой 5.

При диффузии, например фосфора, его источником обычно служит фосфорный ангидрид P_2O_5 , который, взаимодействуя с кремнием, разлагается, в результате чего образуются элементарный фосфор и оксид кремния. Продукты реакции создают на поверхности полупроводниковых пластин стекловидный слой фосфоросиликатов, из которого и происходит диффузия. Кроме того, этот слой предохраняет кремний от эрозии и испарения, а также связывает вредные металлические примеси.

При использовании токсичных веществ (фосфора, сурьмы) в качестве диффузентов должны быть созданы условия для удаления отходов диффузионного процесса специальной вытяжной вентиляцией.

Диффузию из жидкого (рис. 41, б) и газообразного (рис. 41, в) источников выполняют в однозонных термических установках с одной камерой нагрева 8 и специальными устройствами соответственно для подачи жидкого и газообразного диффузентов в рабочий канал 7. При диффузии из жидкого источника газ-носитель, пройдя питатель 9 с жидким диффузентом, выносит его пары в рабочий канал 7 установки. При диффузии из газообразного источника газ-носитель транспортирует в рабочий канал 7 термической установки диффузонт в виде газа, который подается через дозатор 10.

Независимо от источника примеси диффузию проводят при постоянной или переменной температуре.

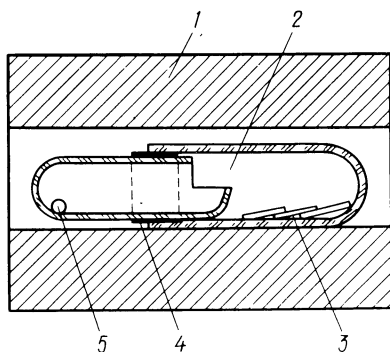


Рис. 42. Диффузия в замкнутом объеме:

1, 2 — камеры нагрева термической установки и рабочая, 3 — полупроводниковые пластины, 4 — прокладка, 5 — диффузент

Диффузия в замкнутом объеме (рис. 42). Рабочей камерой 2 термостатической установки 1 в этом случае служат две кварцевые ампулы, вставленные друг в друга открытыми концами, уплотненные шлифом или платиновой прокладкой 4. Камера должна быть закрыта так, чтобы не было большой утечки паров примеси. В то же время она негерметична, что обеспечивает поступление кислорода и удаление влаги. Оксидная пленка на поверхности полупроводниковых пластин 3 при нагреве адсорбирует газообразную примесь. В качестве источника диффузии при работе с кремнием обычно используют соединение, состоящее из диффузанта 5 и кремния.

§ 20. Контроль качества диффузионных слоев и оксидных пленок

Качество диффузионных слоев характеризуется глубиной залегания и удельным поверхностным сопротивлением. Определяя их, подсчитывают концентрацию неосновных носителей заряда. Основным параметром оксидных пленок, определяемым аналитически, является их толщина.

Глубину залегания диффузионных слоев на полупроводниковых пластинах определяют методами косого (рис. 43, а) или шарового (рис. 43, б) шлифа.

Косой шлиф (рис. 43, а) на полупроводниковых пластинах получают с помощью шлифовального станка и специального приспособления. При этом полупроводниковую пластину приклеивают стороной, не имеющей диффузионного или оксидного слоя, к оправке, сошлифованной под определенным углом. Затем закрепляют оправку в специальном приспособлении, устанавливают на шлифовальник станка, подают абразивную суспензию, включают станок и шлифуют полупроводниковую пластину. По истечении заданного времени останавливают привод шлифовальника, снимают приспособление, промывают полупроводниковую пластину и отклеивают ее от оправки. Так как пластина приклеена к оправке под определенным углом, на ней после шлифовки получается такой же угол косого шлифа.

Анализируют шлиф наряду с другими методами окрашиванием (травлением в кислотах), которое основано на способности участков полупроводника электронной и дырочной проводимости изменять цвет под воздействием специальных составов.

После шлифовки полупроводниковой пластины под углом $3-7^\circ$ к поверхности и окраски угол косо шлифа контролируют на установке ЖК78.08 оптической ориентации слитков или с помощью микроскопа МИМ-7. Глубину залегания диффузионного слоя (мкм) определяют по формуле $h = zm \operatorname{tg} \alpha$ (где z — число делений шкалы на матовом стекле микроскопа МИМ-7, соответствующее видимой ширине слоя; m — цена деления шкалы; α — угол шлифа, град).

В настоящее время существует несколько установок для изготовления шарового шлифа с помощью шара или сферической поверхности и абразивной суспензии. На контролируемой полупроводниковой пластине получают лунку сферической формы, которая должна быть глубже измеряемого слоя.

После окраски шлифа в специальном растворе измеряют с помощью микроскопа МИМ-7 длину хорды, которая является касательной к внутренней концентрической окружности шлифа (рис. 43, б) и определяет нижнюю границу диффузионного слоя. Глубину залегания диффузионного слоя (мм) определяют по формуле $h = X_1^2 K^2 / d$ (где X_1 — половина длины хорды по делениям шкалы микроскопа МИМ-7, мм; K — масштаб увеличения; d — диаметр шара, мм). Для большей точности обычно делают несколько замеров в различных частях пластины и рассчитывают среднее арифметическое значение.

Удельное поверхностное сопротивление измеряют приборами ИУС-2 и ИУС-3, которые отличаются конструктивным исполнением, но имеют одинаковый принцип действия (рис. 44). Ток I от батареи E подводят к полупроводниковой пластине через внешние зонды 1 и 4, устанавливая его значение с помощью переменного резистора R по миллиамперметру mA . Напряжение U между внутренними зондами 2 и 3 измеряют потенциометром $ПТ$. Все зонды укреплены в контактной головке так,

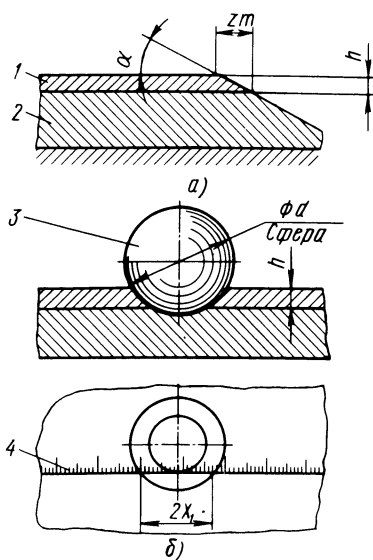
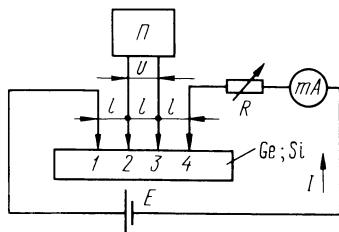


Рис. 43. Определение глубины диффузионных слоев методами шлифов:

а — косо, б — сферического; 1 — диффузионный слой, 2 — пластина, 3 — шлифовальный, 4 — шкала микроскопа

Рис. 44. Схема измерения удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов:

1—4 — зонды



что строго выдерживается равенство расстояний ℓ (см) между ними. Удельное поверхностное сопротивление (Ом·см) определяют по формуле $R_s = \frac{2\pi U}{I}$.

Прибор ИУС-2 состоит из контактного устройства и измерительного блока.

Контактное устройство (рис. 45, а) служит для касания четырьмя зондами, расположенными на одной прямой линии на равных расстояниях друг от друга, измеряемой пластины полупроводникового материала. На шлифованной плите 7 расположен столик 6, который может перемещаться по ней, скользя по масляной пленке. Кронштейн 2 опирается на эту же плиту и имеет стержень 3, верхняя часть которого заканчивается демпфером 1, а на средней закреплены контактная головка 5, прицел и рукоятка 4 ручного привода контактного устройства. Стержень поворачивается относительно своей оси одновременно с рукояткой (контактной головкой) и прицелом.

Контактное устройство имеет два положения: установки и измерения. В положении установки определяют место контактирования зондов с полупроводниковой пластиной, перемещая столик 6 до совмещения выбранного на ней места с четырьмя отверстиями прицела. В положении измерения рукоятку перемещают в соответствующее место кронштейна 2, прицел отходит в сторону и контактная головка своими зондами плавно под действием демпфера 1 опускается до соприкосновения с полупроводниковой пластиной.

Контактная головка представляет собой пластмассовый корпус с подвижно закрепленными в нем четырьмя зондами (цилиндрическими контактами), которые заострены с рабочей стороны и имеют прорезы с противоположной. От выпадания из корпуса зонды предохраняют фторопластовые втулки. В прорезы зондов вставлены пружины, которые служат для их фиксации в определенном положении, нагружения с усилием около 180 мН, создания электрического контакта с зондами и контактными пластинами головки, соединенной кабелем с измерительным прибором блока измерения.

Измерительный блок (рис. 45, б) смонтирован в кожухе, на лицевой панели которого расположены измерительные приборы (микроамперметры), переключатели диапазонов, ручки регулирования тока и установки нуля, тумблер и сигнальная лампа.

Питание внешних (токовых) зондов осуществляется от стабилизатора СТ с большим выходным сопротивлением, чтобы изменение их переходного сопротивления и разброс удельного сопротивления на измеряемой полупроводниковой пластине заметно не изменяли ток питания. Высокое выходное сопротивление стабилизатора тока определяется большим выходным сопротивлением двух транзисторов его оконечного каскада, включенных по схеме с общей базой. Блок питания БП обеспечивает подачу необходимого напряжения на прибор и состоит из трансформатора, с которого напряжение подается на выпрямитель с усмерением, создающий различные положительные напряжения относительно общего провода. Базовые цепи транзисторов стабилизатора тока получают питание от параметрического стабилизатора.

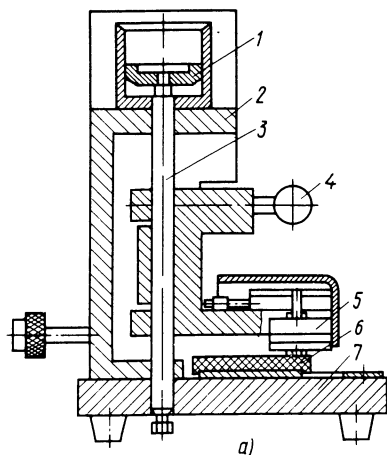
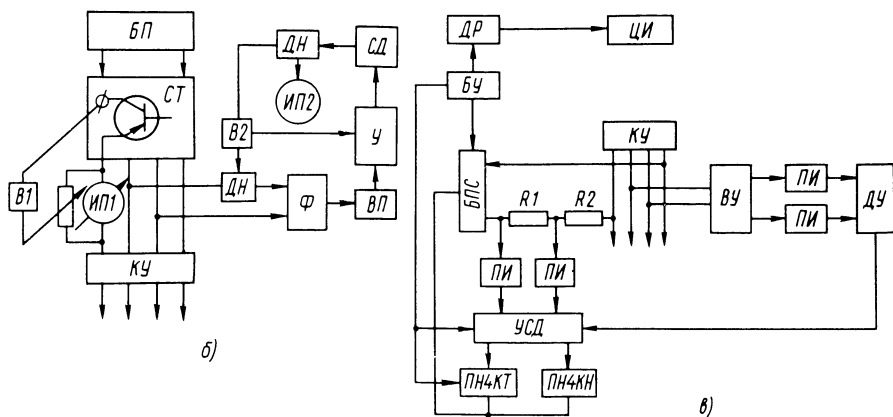


Рис. 45. Измерение удельного поверхностного сопротивления полупроводниковых материалов:

а — контактное устройство, *б, в* — функциональные схемы измерительных блоков приборов ИУС-2 и ИУС-3; 1 — демпфер, 2 — кронштейн, 3 — стержень, 4 — рукоятка, 5 — контактная головка, 6 — столик, 7 — плата



Для измерения тока на внешних зондах служит измерительный прибор ИП1, расположенный на лицевой панели прибора ИУС-2. Диапазоны измерения изменяют переключателем *В1*, подключающим к измерительному прибору шунты, и одновременно регулируют питание транзисторов и напряжение на зондах. В каждом диапазоне можно плавно регулировать ток резистором. На лицевой панели прибора ИУС-2 имеется также переключатель полярности тока и гнезда подключения внешнего измерительного прибора, рассчитанного на малые токи.

Напряжение, снимаемое с внутренних зондов, подается через фильтр *Ф* на вибропреобразователь *ВП*, затем на четырехкаскадный транзисторный усилитель *У*, выход которого нагружен на синхронный детектор *СД*, преобразующий полезный сигнал по частоте и снижающий уровень помех, образующихся при работе вибропреобразователя.

Постоянное напряжение измеряют прибором ИП2. Переключателем *В2* подключают последовательно к внутренним зондам часть резисторов делителя напряжения *ДН*, изменяя этим обратную связь по постоянному

напряжению, диапазоны измерений и коэффициент усиления четырехкаскадного усилителя переменного тока. Измеряемое напряжение пропорционально удельному сопротивлению и току, проходящему через внешние зонды. При неизменном токе удельное поверхностное сопротивление отсчитывают по шкале прибора *ИП2*, отградуированной в соответствующих единицах.

Прибор ИУС-3 также состоит из контактного устройства и измерительного блока. Контактное устройство аналогично контактному устройству прибора ИУС-2, но в отличие от него помещено в литой корпус с откидывающимся кожухом и замком, панелями с индикаторными лампами, блоком переключателей, панелью с регулировочными резисторами и платой входного устройства. Измерительный блок (рис. 45, в) смонтирован в кожухе, на лицевой панели которого расположен тумблер для включения сетевого питания.

Переменное напряжение с блока преобразования сигналов *БПС* подается на внешние (токовые) зонды контактного устройства *КУ* через два последовательно включенных резистора *R1* и *R2*. Резистор *R1* выполняет функции измерительного и предназначен для контроля задаваемого тока, а токозадающий резистор *R2* определяет ток, протекающий через внешние зонды и его собственное сопротивление значительно больше измеряемого удельного поверхностного сопротивления полупроводниковой пластины.

Напряжение, снимаемое с измерительного резистора, подается на оба левых истоковых повторителя *ПИ*, усиливается и поступает для детектирования на устройство синхронного детектора *УСД*, где создается пульсирующее напряжение, постоянная составляющая которого имеет отрицательную полярность. Эта постоянная составляющая пропорциональна амплитуде тока внешних зондов. Пульсации напряжения сглаживаются фильтром Φ .

Переменное напряжение подается с внутренних зондов контактного устройства *КУ* на входное устройство *ВУ* и с его выхода поступает на оба правых истоковых повторителя *ПИ*, которые служат для согласования входного (измеряемого) сопротивления со входным сопротивлением дифференциального усилителя *ДУ* и имеют высокое входное сопротивление и малую входную емкость. Сигнал с правых истоковых повторителей *ПИ* поступает на дифференциальный усилитель *ДУ*, собранный на транзисторах. На коллекторе одного из транзисторов выделяется разностный сигнал частотой 50 Гц, амплитуда которого пропорциональна разности потенциалов между внутренними зондами, определяемой током, пропускаемым через образец, и его удельным поверхностным сопротивлением.

Дифференциальный усилитель *ДУ* не обеспечивает подавления сигнала, зависящего от падения напряжения на переходных контактных сопротивлениях токовых зондов. Для уменьшения этого сигнала создана цепь отрицательной обратной связи *ДУ* с *УСД*, соединенная с цепью внешних зондов.

Разностный сигнал частотой 50 Гц, усиленный дифференциальным усилителем *ДУ*, подается на первичную обмотку трансформатора устройства синхронного детектора *УСД*. После синхронного детектирования и фильтрации возникает постоянное напряжение отрицательной полярности, которое пропорционально амплитуде напряжения, образующегося между внутрен-

ними зондами. Постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде тока внешних зондов, подается с *УСД* на вход преобразователя напряжения — частота канала “ток” *ПНЧКТ* и в блок преобразования сигнала *БПС*. Такая схема позволяет изменять чувствительность блока *БПС* и этим компенсировать неточность изготовления зондовой головки.

Постоянное напряжение, пропорциональное амплитуде напряжения, возникающего между средними зондами, подается с *УСД* через один из его регулирующих резисторов на вход преобразователя напряжения — частота канала “напряжение” *ПНЧКН*, где происходит преобразование частоты сигнала, служащего для управления декадным регистром *ДР*.

Импульсы с *ПНЧКТ* поступают на блок управления *БУ* и запускают счетный триггер. В определенный момент *ПНЧКТ* создает положительный перепад напряжения, который, преобразуясь, поступает на усилитель сброса декад и делает их равными нулю. При этом напряжение на выходе триггера становится нулевым, и на выходе *ПНЧКН* возникает положительное напряжение, которое способствует образованию импульсов, поступающих на счетный вход трехразрядного декадного счетчика. Следующий импульс устанавливает триггер *БУ* во второе устойчивое положение, напряжение на *ПНЧКН* становится равным нулю и импульсы на его входе исчезают. Такое состояние продолжается до прихода импульсов с *ПНЧКТ* (около 1 с). При этом сохраняется показание счетчика, пропорциональное отношению амплитуды напряжения между внутренними зондами к амплитуде тока крайних зондов.

Настройкой чувствительности блока *БПС* получают такой коэффициент пропорциональности, при котором на цифровом индикаторе *ЦИ* должно появиться значение удельного поверхностного сопротивления полупроводниковой пластины. Управляют цифровым индикатором импульсы, поступающие с декадного регистра *ДР*, в котором в зависимости от положения триггеров формируется нужный сигнал.

Ежедневно перед началом работы рекомендуется измерить приборами удельное поверхностное сопротивление контрольных образцов. При пяти измерениях в одном и том же месте удельного сопротивления пленок толщиной 0,5 до 1 мкм разброс результатов не должен превышать $\pm 1,5\%$ от среднего значения. Если разброс больше, рекомендуется притереть контактные поверхности зондов трех-четырёхразовым перемещением их совместно со столиком контактного устройства вдоль линии расположения полупроводниковой пластины.

При работе следует особенно бережно обращаться с контактной головкой прибора. Давить на рукоятку контактного устройства для ускорения опускания головки на измеряемую пластину нельзя, так как это может привести к выходу из строя зондов или снижению гарантированного числа контактирований. При измерении удельного сопротивления укладывают пластину на столик контактного устройства и, перемещая его, совмещают четыре отверстия прицела с местом измерения на пластине. Затем переводят рукоятку контактного устройства в положение измерения и опускают зонды на пластину. Подбирают переключателем соответствующий диапазон, на котором показания индикаторной лампы старшего разряда отличаются от нуля и не гаснет индикаторная лампа младшего разряда. Показания при-

бора считают установившимися, если два следующих друг за другом показания отличаются не более чем на ± 1 единицу младшего разряда. Если показания прибора при откинутаом кожухе отличаются от показаний при опущенном кожухе, измерения выполняют при опущенном кожухе, исключая погрешность, вводимую фотопроводимостью.

Погрешность измерений удельного сопротивления рассчитывают, пользуясь контрольными образцами. При этом рассчитанные и измеренные на контрольном образце значения удельного сопротивления не должны отличаться более чем на $\pm 4,5\%$.

Толщину оксидных пленок t (мкм) определяют по количеству так называемых красных интерференционных полос, пользуясь, например, микроскопом МИИ-4. Расчеты ведут по формуле $t = 0,27N$ (N — количество красных интерференционных полос; $0,27$ — высота неровностей контролируемой поверхности, соответствующая искривлению в одну интерференционную полосу, мкм). При четырех-пяти полосах толщина оксидного слоя на кремниевых пластинах составляет $1-1,3$ мкм.

Для определения толщины оксидного слоя используют также другие методы, например эллипсометрический и отражения поляризованного луча, которые не нашли широкого применения.

§ 21. Термическое оборудование для выполнения процессов окисления и диффузии

Однозонная трехканальная термическая установка (рис. 46), предназначенная для выполнения термических процессов диффузии и окисления в газовом потоке открытого рабочего канала на полупроводниковых

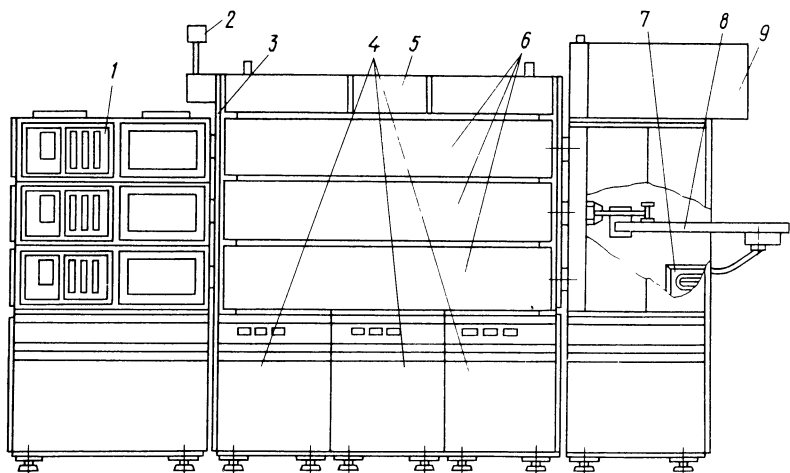


Рис. 46. Однозонная трехканальная термическая установка:
1 — устройство газораспределения, 2 — сигнальная лампа, 3 — электроды,
4 — шкафы приборных оснований, 5 — теплообменник, 6 — нагревательные
камеры, 7 — измерительный стенд, 8 — механизм перемещения термпары,
9 — камера загрузки-выгрузки.

пластинах, состоит из четырех частей: электропечи 3, устройства газораспределения 1, камеры 9 загрузки—выгрузки и измерительного стенда 7. Камера загрузки—выгрузки и измерительный стенд являются отдельными изделиями и поставляются по желанию заказчика.

Электропечь 3 имеет основание для нагревательных камер 6, систему терморегулирования и теплообменник 5. Основанием электропечи служит металлический сварной каркас, представляющий собой две боковые рамы, которые для жесткости связаны снизу болтовым соединением между собой и с приборным основанием, а сверху — с корпусом теплообменника. Над приборным основанием расположены одна над другой три нагревательные камеры 9. Приборное основание состоит из трех сварных металлических шкафов 4, в каждом из которых размещены системы управления и регулирования температуры, а также блок питания нагревательных камер 6.

В откидных частях шкафов расположены элементы систем управления и регулирования (регулятор РЕПИД-1М, автоматический выключатель, магнитный пускатель и плавкие вставки), а на задних стенках — по три блока симисторов (симметричных тиристоров), вентилятор для охлаждения и устройства коммутации. Силовые трансформаторы установлены в нижней части шкафов. Сверху приборы управления и терморегулирования для защиты от нагрева закрыты крышкой с теплоизоляцией. Для обслуживания приборов в задней части шкафов имеются съемные крышки.

Пусковое программное устройство выполнено в виде выдвижного шасси, на передней панели которого размещены органы управления (сигнальные лампы, кнопочные переключатели, вольтметры), а внутри — реле времени, потенциометры-датчики с цифровыми счетчиками, предохранитель, коммутационное реле, счетчики времени выработки и элементы коммутации.

Нагревательные камеры (рис. 47) имеют цилиндрическую форму. Нагревательный элемент представляет собой две соосно расположенные спирали 6 из материала высокого удельного сопротивления, соединенные между собой параллельно, но разделенные токоподводами 5 и системой

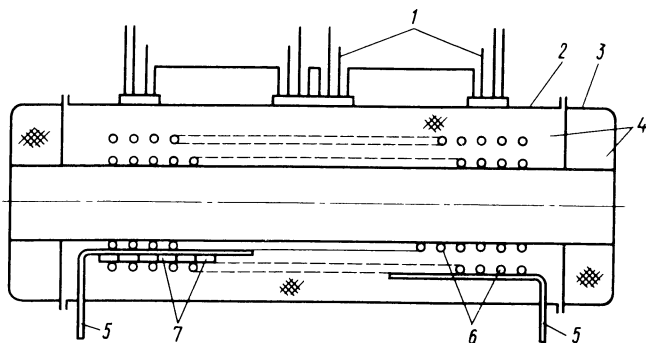


Рис. 47. Нагревательная камера термической установки:
1 — термодатчики, 2 — кожух, 3 — алюминиевая крышка, 4 — керамическое волокно, 5 — токоподводы, 6 — внутренняя и наружная спирали, 7 — керамические изоляторы

питания на три самостоятельные секции. Снаружи нагревательный элемент теплоизолирован прессованным керамическим волокном 4 и закрыт алюминиевым кожухом 2, на котором по краям и в центре расположены коробки для крепления регулирующих и контрольных термопар 1 соответственно с градуировкой ПР30/6 и ПП1.

Охлаждаются нагревательные камеры воздушным потоком, направляемым металлическими экранами. Внутри каждой нагревательной камеры расположена служащая тепловым демпфером корундовая труба, уплотненная на выходе теплоизолирующими кольцами. В качестве рабочего канала (реактора или диффузионной трубы) используется труба, которая помещается внутри корундовой или непосредственно проходит сквозь нагревательную камеру и уплотняется на выходе.

Теплообменник заключен в сварной металлический короб и представляет собой радиатор, охлаждаемый проточной водой и обдуваемый воздухом от шести осевых вентиляторов. На входе воды в радиатор установлено гидравлическое реле (реле давления), сигнализирующее о прекращении ее подачи; управляют работой теплообменника с пульта.

В термической установке применена трехканальная независимая система регулирования температуры (рис. 48). На примере центральной сек-

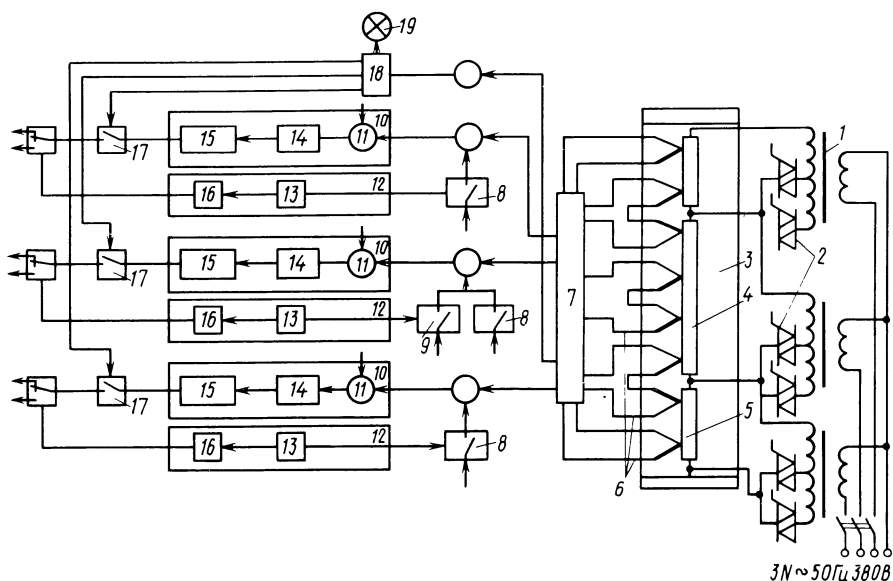


Рис. 48. Функциональная схема автоматической системы регулирования температуры термической установки:

1 — силовой трансформатор, 2 — симисторы, 3 — нагреватель, 4, 5 — центральная и краевая секции, 6, 7 — термопары и блок стабилизации их холодных концов, 8, 9 — потенциометры-задатчики, 10 — регулятор температуры, 11 — задатчик, 12, 18 — блоки программного управления и ограничения температуры, 13 — реле времени, 14 — усилитель постоянного тока, 15 — функциональное устройство, 16 — цепь задержек, 17 — коммутирующее устройство, 19 — сигнальная лампа

ции 4 нагревателя 3 рассмотрим схему автоматического регулирования. При работе установки в горячих концах термопар 6 возникает термо-эдс, которая через блок стабилизации холодных концов (термостат) 7 поступает на регулятор температуры 10 и сравнивается с заданным задатчиком 11 сигналом. Это устройство имеет прецизионный источник постоянного напряжения и десятиоборотный потенциометр-задатчик 9, позволяющий очень точно устанавливать требуемое напряжение, соответствующее заданной температуре рабочего канала.

Разность между заданным напряжением и действительным значением термо-эдс в виде постоянного напряжения рассогласования (сигнала) поступает на высокочувствительный усилитель постоянного тока 14, усиливается, далее еще раз усиливается функциональным усилителем мощности 15 и дважды преобразуется сначала в сигнал управления по пропорционально-интегральному закону, а затем в фазоимпульсный сигнал управления. В зависимости от этого сигнала изменяется приоткрытие кремниевых управляемых симметричных клапанов (симисторов) 2, включенных во вторичную обмотку силового трансформатора 1, и в результате уменьшается или увеличивается мощность, подаваемая в центральную секцию 4 нагревателя 3.

Для защиты нагревателя от перегрева в схему управления введен блок 18 ограничения температуры, срабатывающий от суммарного сигнала двух термопар с градуировкой ПР30/6, установленных в крайних секциях 5 нагревателя 3. При превышении предельной температуры коммутирующее устройство 17 отключает подачу сигнала управления симисторами и включает лампу 19, сигнализирующую о сложившейся ситуации.

В каждой нагревательной камере установлено по восемь термопар. В центральной секции используются четыре термопары, две из которых — средние с градуировкой ПР30/6 — соединены последовательно, а две крайние с градуировкой ПП1 — встречно с двумя термопарами крайних секций нагревателя. Холодные концы двух крайних термопар этих секций, как и других, подключены через блоки стабилизации холодных концов к регулятору температуры.

Такое соединение повышает чувствительность сигнала термо-эдс и, кроме того, каждая пара термопар показывает отклонение температуры в любой крайней секции нагревателя по отношению к действительной температуре в центральной секции. В системе автоматического регулирования температуры крайние секции подчинены центральной и все возможные температурные возмущения компенсируются изменением их нагрева.

Электродогреватель имеет блок 12 программного управления автоматическим регулированием температуры и динамическим управлением нагрева лодочки с пластинами. Сигнал программного регулирования формируется регулятором температуры 10 при отклонении термо-эдс датчика температуры центрального канала регулирования от заданного потенциометром-задатчиком 9. С помощью трех других потенциометров-задатчиков 8, установленных в каждом канале, изменяются параметры регулирования в зависимости от предварительной температуры нагрева, длины и массы лодочки с пластинами. Программирование выполняется реле времени 13, которое коммутирует цепи на входе в основную систему регулирования и цепи за-

держек 16, переключающие выходной сигнал регулятора температуры 10 на включение силового блока питания в соответствующий режим.

При работе установки в зону с постоянной температурой вводят кварцевую подставку-лодочку с полупроводниковыми пластинами, прогревают ее и подают в рабочий канал парогазовую смесь, которая, перемещаясь, омывает полупроводниковые пластины, частично осаждаясь на них. Когда заданное время термообработки истечет, подачу парогазовой смеси прекращают и извлекают лодочку с пластинами из рабочего канала электропечи. Такую термообработку применяют, если лодочки с пластинами находятся в рабочем канале в течение нескольких часов (длительный процесс). В этом случае время переходных процессов мало и не отражается на качестве термообработки пластин.

При кратковременной термообработке (несколько минут) применяют двухступенчатый нагрев. Вначале лодочку с пластинами нагревают в рабочем канале при температуре на $100\text{--}150^\circ\text{C}$ ниже заданной, а затем быстро поднимают температуру. При таком режиме переходные процессы очень коротки и также не отражаются на качестве термообработки.

Устройство газораспределения (рис. 49) имеет основание в виде стального металлического каркаса, на котором размещены три шкафа по одно-

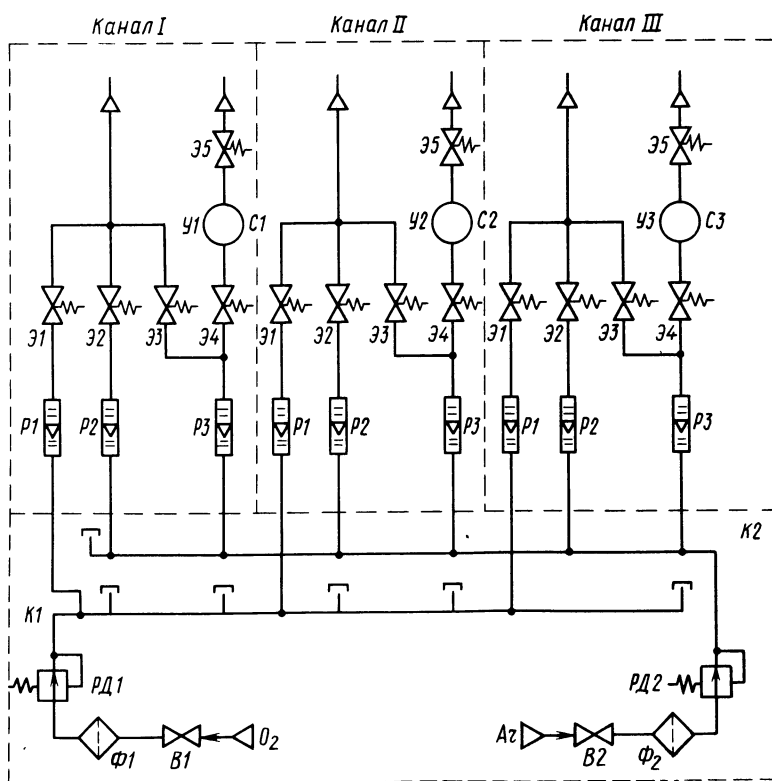


Рис. 49. Схема устройства газораспределения термической установки

му на каждый канал электропечи и может подключаться к вытяжной системе. Внутри каркаса находятся по два вентиля, фильтра, реле давления и распределительных коллектора, которые предназначены для подачи кислорода и аргона в электропечь. Каждый шкаф разделен на два отсека, в одном из которых установлен термостат с увлажнителем или микрохолодильник со смесителем, а в другом — контрольно-запорная газовая арматура и система автоматического регулирования температуры и питания. Все элементы устройства газораспределения изготовлены из фторопласта, полиэтилена и нержавеющей стали, т.е. материалов, не подверженных коррозии.

Устройство газораспределения служит для получения парогазовой смеси заданных параметров при проведении термических процессов изготовления электронно-дырочных переходов и имеет автоматическую (программную) систему управления образованием парогазовой смеси с термостатированием диффузанта в смесителе при проведении первой стадии диффузии или воды в увлажнителе при проведении процессов окисления. Автоматическая система обеспечивает поддержание температуры на заданном уровне с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и построена аналогично автоматической системе терморегулирования электропечи.

При создании оксидной пленки на полупроводниковых пластинах, например в канале *I* электропечи, кислород из магистрали проходит через вентиль *B1*, фильтр *Ф1*, реле давления *РД1*, коллектор *К1*, ротаметр *Р1*, электромагнитные клапаны *Э1*, *Э3*, *Э4*, увлажнитель *У1*, электромагнитный клапан *Э5* и далее парогазовая смесь подается в канал электропечи. Аналогичен путь аргона, но вместо увлажнителя он должен пройти смеситель *С1* с диффузантом, например бромистым бором (BBr_3) или фосфорным ангидридом (P_2O_5).

Камера загрузки—выгрузки, как уже отмечалось, являясь дополнительным оборудованием, изготавливаемым по специальному заказу применительно к конкретному типу термической установки, предназначена для создания обеспыленной атмосферы при проведении термических процессов. На рис. 50, *а—в* показаны три схемы камер загрузки—выгрузки с горизонтальным и вертикальным и сверху вниз и снизу вверх ламинарным потоком воздуха для двухканальных диффузионных электропечей. Такие камеры могут быть изготовлены для термических установок с другим количеством каналов.

Принцип создания обеспыленной атмосферы во всех камерах одинаков, но камера с вертикальным ламинарным потоком воздуха сверху вниз (см. рис. 50, *б*) предназначена для проведения термических процессов с выделением вредных для здоровья работающих продуктов реакции, которые обязательно должны удаляться вытяжной вентиляцией.

Измерительный стенд, предназначенный для контроля температуры и определения места нахождения и длины зоны с заданной постоянной температурой в каналах электропечи, состоит из потенциометра постоянного тока, контрольной платино-платинородиевой термопары градуировки ПП1 и сосуда Дьюара для жидкого азота.

На смену автономному термическому оборудованию пришли поточные линии АПЛ-Д-18-100 и АПЛ-Д-24-100, предназначенные для комплексно-

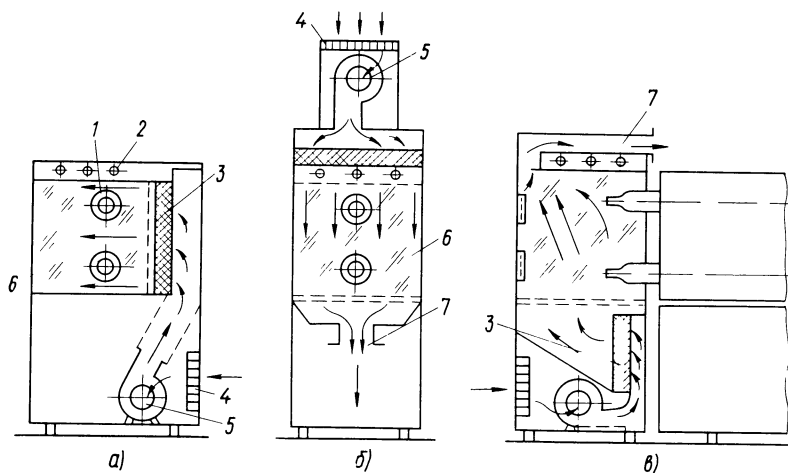


Рис. 50. Камеры загрузки-выгрузки с ламинарным потоком воздуха:

а — горизонтальным, *б, в* — вертикальным сверху вниз и снизу вверх: 1 — рабочий канал, 2 — лампы освещения, 3 — фильтр, 4 — воздухозаборная решетка, 5 — вентилятор, 6 — шторка из оргстекла, 7 — патрубок для удаления воздуха

го выполнения процессов окисления и диффузии с высокой точностью поддержания режимов и автоматизацией основных операций. Эти линии имеют соответственно 18 и 24 реактора (канала), служащих для одновременной термической обработки помещенных в кассету 100 полупроводниковых пластин диаметром до 100 мм. Линии монтируются в пылезащитном коридоре с содержанием менее 3500 пылинок размером 0,5 мкм в 1 м³ воздуха. Загрузка полупроводниковых пластин в термические реакторы и выгрузка из них производятся в этом коридоре. Реакторы могут располагаться относительно центрального пульта управления справа или слева.

Линии АПЛ-Д представляют собой гибкие производственные системы (ГПС) и могут перестраиваться на выполнение операций окисления и диффузии при изготовлении различных полупроводниковых приборов и микросхем. Оборудование, входящее в эти линии, комплектуется по четырем вариантам. Линии АПЛ-Д состоят из агрегатированной установки автоматической загрузки, трехканальных однозонных диффузионных термических установок, модуля пылезащиты (трех модификаций), накопителя длительного хранения (двух модификаций), устройства газораспределения (двух модификаций), пульта оперативной информации и центрального пульта (пяти модификаций).

Две трехканальные диффузионные однозонные термические установки 02ДОМ-75-001 оборудованы устройством газораспределения УГ-2 и в комплексе с системой пылезащиты представляют собой агрегат АДС-6-100. Таких агрегатов в линии может быть несколько и каждый из них имеет свою систему управления, связанную с ЭВМ, что позволяет корректиро-

вать технологические режимы диффузии и окисления в зависимости от отклонения их параметров. Устройство газораспределения служит для подготовки газовой смеси и ее автоматической подачи по заданной программе в реактор при окислении и диффузии (загонке и разгонке).

Управляют линией АПЛ-Д с центрального пульта. Перекладка полупроводниковых пластин из транспортных кассет в кварцевые и, наоборот, загрузка кассет в реактор и выгрузка из него, подача кассет с трассы транспортирования к механизму перекладки и обратно выполняются автоматически. Информация о ходе технологического процесса и техническом состоянии оборудования поступает на дисплей с цветным изображением.

Линии АПЛ-Д могут быть укомплектованы установками "Изотрон-1" и "Изотрон-2" для осаждения слоев поликристаллического кремния, нитрида кремния и фосфоросиликатных стекол, а также установкой ПХО-150 для плазмохимической обработки пластин. Кроме того, на них могут быть смонтированы агрегаты термокомпрессионного окисления "Термоком".

Контрольные вопросы

1. Что такое диффузия и каким законам она подчиняется?
2. Каково назначение пленок диоксида кремния и какими методами их наносят?
3. Какими методами выполняют диффузию?
4. Как проводят диффузию в потоке газа-носителя?
5. Какие параметры контролируют после диффузии и окисления полупроводниковых пластин?
6. Каков принцип действия термической установки диффузии?
7. Каковы достоинства автоматических поточных линий диффузии АПЛ-Д?

ГЛАВА ПЯТАЯ. ЭЛИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

§ 22. Общие сведения

Элионная (электронно-ионная) технология производства полупроводниковых приборов и микросхем основана на использовании направленного переноса энергии электронными, а вещества — ионными пучками (лучами). При элионном изготовлении электронно-дырочных переходов ионные пучки служат для легирования полупроводников, а электронные для сплавления.

И о н н о е л е г и р о в а н и е по сравнению с диффузионным обладает следующими достоинствами:

использование пучка заряженных частиц (ионов) позволяет управлять технологическими операциями с помощью электрических и магнитных полей;

ионной бомбардировкой удастся легировать полупроводник такими примесями, которые нельзя ввести другими способами;

получаемые концентрации примесей могут значительно превышать их предел растворимости при равновесных условиях;

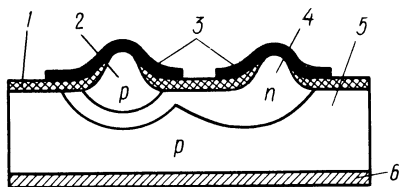


Рис. 51. Транзисторная *p-n-p*-структура: 1 — пленка диоксида кремния, 2, 4 — эмиттерная и базовая области, 3 — невыпрямляющие контакты, 5 — коллектор, 6 — пленка никеля

отжиг полупроводников можно производить при температурах более низких, чем диффузия или сплавление;

область легирования ионами четко определяется краем маски, в то время как при обычной диффузии примесь частично проникает под маску.

Электронно-лучевую обработку как термический процесс используют для сварки, испарения, плавки, сверления и фрезерования, а также для сплавления легирующих и контактных материалов с полупроводниками и герметизации корпусов приборов и микросхем. В этих случаях применяют лучи с высокой плотностью энергии. Так, в микроскопический объем может быть передана энергия, равная 10^9 Вт/см². Если необходимо, энергию электронов можно выделить в тонком слое материала.

Нетермические процессы электронно-лучевой обработки используют при анализе и контроле различных изделий, например в электронной микроскопии. Электронный луч, легко поддающийся управлению, можно быстро и точно перемещать в пространстве, а также изменять его интенсивность во времени.

Транзисторная *p-n-p*-структура, полученная с помощью электронного луча, показана на рис. 51. На кремниевом кристалле (пластине) *p*-типа двойным локальным легированием фосфором электронным лучом создана базовая *p*-область 4. Эмиттерная *p*-область 2 также создана с помощью электронного луча последовательным локальным легированием бором.

Эмиттерная и базовые области на поверхности кристалла защищены пленкой 1 диоксида кремния. К открытым участкам эмиттера и базы созданы невыпрямляющие контакты 3. Коллектором 5 служит исходный кремний *p*-типа, невыпрямляющий контакт (пленка никеля) 6 к которому создается перед электронно-лучевой обработкой.

§ 23. Изготовление электронно-дырочных переходов элионной технологией

Рассмотрим схему технологического процесса изготовления полевого транзистора по элионной технологии. Получение электронно-дырочных переходов электронным и ионным пучками показано на рис. 52, а, б.

При бомбардировке электронами (рис. 52, а) их источником служит раскаленный вольфрамовый катод 1. Под действием ускоряющего напряжения (до 200 кВ), приложенного к аноду 3, электронный пучок 10, управляемый модулятором, проходит через диафрагму 4, две линзы 6 и фокусируется на полупроводниковой пластине 7, покрытой легирующим веществом. Пластина расположена на рабочем столике 8 установки, который

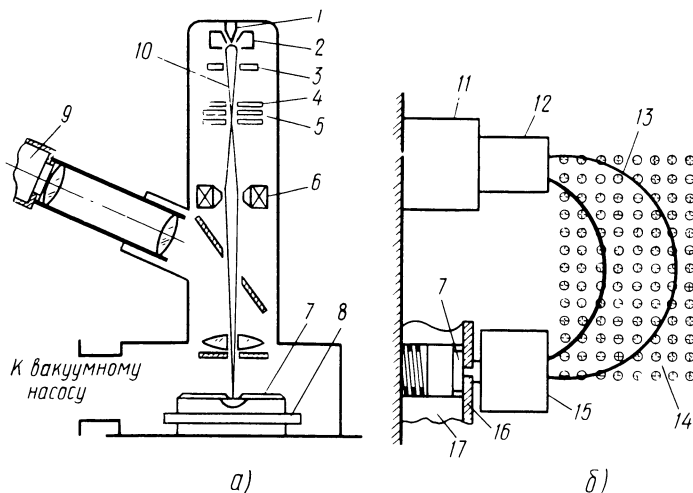


Рис. 52. Схемы получения электронно-дырочных переходов с помощью пучков:

а — электронного, *б* — ионного; 1 — катод, 2 — управляющий электрод, 3 — анод, 4 — диафрагма, 5 — стигматор, 6 — электромагнитная линза, 7 — полупроводниковая пластина, 8 — рабочий столик, 9 — микроскоп, 10, 13 — электронный и ионный пучки, 11 — источник ионов, 12 — ионно-оптическая фокусирующая система, 14, 15 — системы магнитного отклонения и тормозящая, 16 — маска, 17 — кассета

может автоматически перемещаться с заданным шагом в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

В результате электронной бомбардировки происходит локальное сплавление и атомы легирующего вещества равномерно распределяются в расплаве, после кристаллизации которого на границе данной области образуется электронно-дырочный переход, имеющий микросплавную или микродиффузионную структуру, что зависит от времени воздействия электронного пучка. Если время воздействия лежит в пределах нескольких секунд, заметной диффузии примеси в твердую фазу не происходит и структура перехода соответствует микросплавной. При более длительной обработке получают микродиффузионные структуры. Процесс ведут в вакууме. Действие пучка можно наблюдать с помощью микроскопа 9.

При ионном легировании (рис. 52, б) пучок 13 ионов примесного вещества проходит фокусирующую 12, отклоняющую 14 и тормозящую 15 системы и попадает на полупроводниковую пластину 7. Для локализации мест бомбардировки находящиеся в кассете 17 пластины могут быть частично закрыты маской 16.

Обладая большой кинетической энергией, ионы, сталкиваясь с поверхностью полупроводника, внедряются на определенную глубину в его кристаллическую решетку, в результате возникает область противоположного типа электропроводности, на границе которой образуется электронно-дырочный переход. Этот процесс также ведут в вакууме, и он поддается

точному управлению, что обеспечивает получение переходов с заданными параметрами и хорошую воспроизводимость.

Последовательность операций при изготовлении полевого транзистора, в котором область канала получают ионным легированием *n*-кремния бором, показана на рис. 53, *а—к*.

Исходную пластину кремния (рис. 53, *а*) окисляют в парах воды (рис. 53, *б*), а затем в областях истока и стока диоксид кремния удаляют (рис. 53, *в*). Через полученные окна проводят термическую диффузию бора (рис. 53, *г*), вновь окисляют пластину (рис. 53, *д*) и удаляют оксид уже в областях затвора и контактов (рис. 53, *е*). Следующая операция — получение диэлектрика затвора в атмосфере сухого кислорода и стабилизация его фосфором (рис. 53, *ж*). Канал транзистора получают ионным легированием бора (рис. 53, *з*). Далее в области контактов оксид удаляют (рис. 53, *и*), напыляют электронным лучом алюминий и создают омические контакты (рис. 53, *к*), необходимые для присоединения электродных выводов.

Ознакомимся с использованием электронного пучка при получении кремниевых диодов (рис. 54, *а—д*). После механической и химической обработки пластину *n*-кремния окисляют (рис. 54, *а*), удаляют с одной ее стороны оксид и напыляют на эту сторону слой золота (рис. 54, *б*), который служит для создания невыпрямляющего контакта с кремнием. На поверхность, покрытую оксидом, напыляют слой борного ангидрида (рис. 54, *в*).

Затем на электронно-лучевой установке производят локальное расплавление ангидрида бора B_2O_3 и диоксида кремния, в результате чего кремний легируется бором и образуется электронно-дырочный переход (рис. 54, *г*). Оставшийся борный ангидрид удаляют, а на площадки электродов перехода напыляют слой алюминия (рис. 54, *д*). Далее следуют обычные операции сборки прибора.

Процесс ионного легирования осуществляется при комнатной температуре и по сравнению с обычной диффузией довольно быстро. Полупроводниковые пластины для устранения радиационных дефектов, возникающих под действием ионной бомбардировки, необходимо кратковременно отжечь при низкой температуре. Температура отжига кремния составляет примерно 700°C , а время — 30 мин.

Для улучшения частотных свойств обычных транзисторов необходимо снизить толщину базового слоя. Термической диффузией можно получить транзисторы с минимальной толщиной базового слоя примерно 0,1 мкм; предельная частота усиления по току таких приборов менее 1 ГГц. Ионным легированием удается изготовить транзисторы с базой толщиной около 0,05 мкм; их предельная частота усиления по току достигает 6 ГГц. Методом двойного ионного легирования (фосфором и бором) получены электронно-дырочные переходы в алмазе, арсениде галлия GaAs и карбиде кремния SiC.

Элионную технологию применяют также для создания транзисторов со структурой металл — оксид — полупроводник (МОП) и интегральных микросхем на их основе. МОП-транзисторы благодаря их особенностям

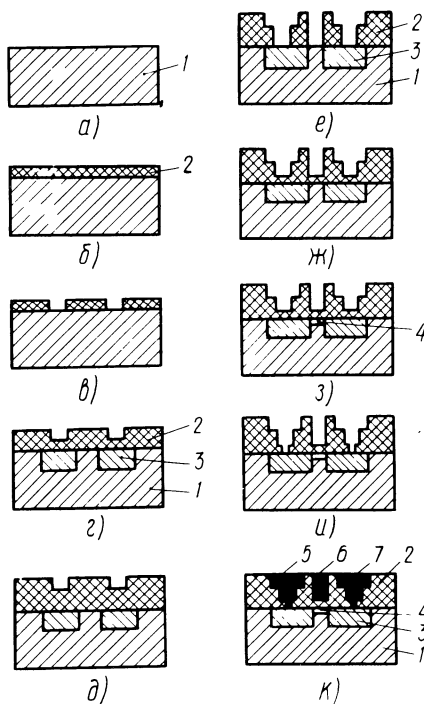


Рис. 53. Последовательность операций при изготовлении полевого транзистора:

а — пластина кремния электронного типа электропроводности, *б* — первичное окисление, *в* — удаление диоксида кремния в области истока и стока, *г* — диффузия бора, *д* — вторичное окисление, *е* — удаление диоксида кремния в области затвора и контактов, *ж* — окисление для получения диэлектрика затвора и стабилизация фосфором, *з* — создание канала ионным внедрением бора, *и* — удаление диоксида кремния в области контактов, *к* — напыление алюминия электронным пучком и создание рисунка металлизации; 1 — кремний, 2 — диоксид кремния, 3 — область, легированная бором, 4 — канал, 5, 6, 7 — невыпрямляющие контакты истока, затвора и стока

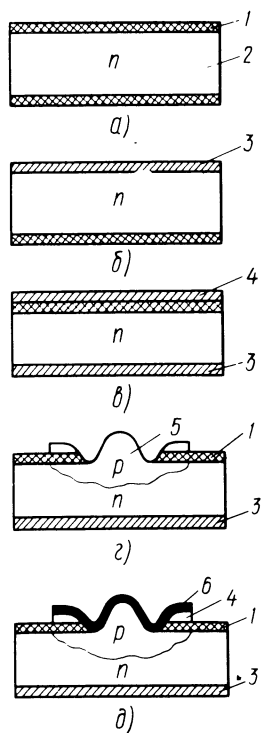


Рис. 54. Последовательность выполнения операций при изготовлении кремниевых диодов электронным пучком:

а — окисление, *б* — одностороннее удаление диоксида кремния и напыление золота, *в* — напыление борного ангидрида, *г* — создание электронно-дырочного перехода, *д* — получение невыпрямляющего контакта; 1 — слой диоксида кремния, 2 — кремний, 3 — золото, 4 — борный ангидрид, 5 — область дырочной электропроводности, 6 — алюминий

можно использовать как в качестве активных, так и пассивных элементов интегральных микросхем.

Ионное легирование позволяет свести к минимуму паразитные емкости транзисторов и, кроме того, широко применяется в технологии МОП БИС (больших интегральных схем), так как обеспечивает низкие пороговые

напряжения, хорошую воспроизводимость и быстроедействие таких схем, уменьшает их геометрические размеры.

Одним из достоинств элионной технологии является возможность полной автоматизации производственного процесса. Регулируя энергию и дозы ионов, можно в широких пределах изменять распределение примеси в легированном слое, что весьма существенно, так как от этого зависят электрические свойства перехода.

§ 24. Оборудование для выполнения процессов элионной технологии

Для изготовления электронно-дырочных переходов по элионной технологии используют электронно-лучевые и ионно-лучевые установки.

Электронно-лучевая установка (рис. 55) состоит из вакуумной системы, двух вакуумных камер, системы управления электронным лучом и устройства для перемещения рабочего столика.

С помощью вакуумной системы, состоящей из форвакуумного 8 и диффузионного 9 насосов, а также трубопроводов, в вакуумных камерах создают и поддерживают давление $1,3 \cdot 10^{-2} - 1,3 \cdot 10^{-1}$ Па ($10^{-4} - 10^{-3}$ мм

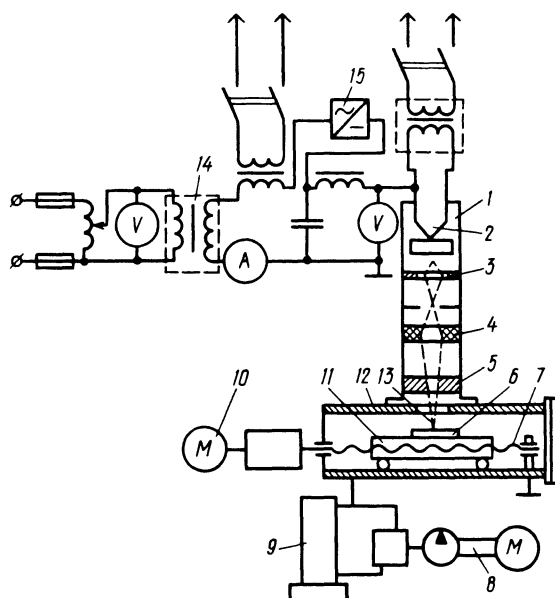


Рис. 55. Схема электронно-лучевой установки:
1 — электронная пушка, 2 — катод, 3 — анод, 4 — электромагнитная фокусирующая линза, 5 — отклоняющая система, 6 — полупроводниковая пластина, 7 — ходовой винт, 8, 9 — форвакуумный и диффузионный насосы, 10 — электродвигатель привода столика, 11, 12 — рабочий столик и камера, 13 — электронный пучок, 14 — высоковольтный трансформатор, 15 — выпрямитель

рт. ст.). В первой камере расположена электронная пушка 1, электромагнитная фокусирующая линза 4 и электростатическая (отклоняющая) система 5.

При работе установки катод 2 электронной пушки, изготовленный из вольфрамовой проволоки, нагревают до температуры $2400\text{--}2500^\circ\text{C}$, а к аноду 3 от высоковольтного трансформатора 14 через выпрямитель 15 подводят напряжение (для различных систем от 20–30 до 100–150 кВ). Испускаемые катодом электроны под действием магнитного поля приобретают большую скорость и фокусирующими электростатическими и электромагнитными линзами направляются в виде пучка диаметром в несколько десятков микрон на обрабатываемую пластину. В результате электронной бомбардировки локальные участки поверхности пластины разогреваются до необходимой температуры. При этом плотность мощности достигает $10^4\text{--}10^6\text{ Вт/см}^2$.

Размещенную во второй – рабочей – камере 12 полупроводниковую пластину можно перемещать горизонтально в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этой камере имеются оптическое окно и детектор отраженных электронов (сканирующего электронного микроскопа) для контроля поверхности пластины.

Рабочий столик 11 перемещается двумя приводными механизмами с шаговыми двигателями 10, расположенными снаружи рабочей камеры 12. Скорость перемещения можно изменять от 5,12 до $1,25\cdot 10^{-4}$ мм/с, причем каждый управляющий импульс (шаг) соответствует сдвигу столика на 10 мкм.

Система управления электронным пучком обеспечивает необходимые его отклонения, длительность обработки изделия, регулирование тока, а также изменение характера пульсаций.

Ионно-лучевая установка ИЛУ-3 является одной из первых промышленных установок, предназначенных для ионной имплантации полупроводниковых пластин с энергией ионов легирующих веществ 100–300 кэВ, и до настоящего времени используется в микроэлектронике. Новыми установками ионной имплантации являются "Везувий-3М", "Везувий-9" и "Везувий-8", соответственно предназначенные для обработки полупроводниковых пластин диаметром 76, 100 и 150 мм.

Установка "Везувий-3М" позволяет легировать полупроводниковые пластины ионами, энергия которых достигает 150 кэВ. Управляет установкой оператор.

Установка "Везувий-9" имеет энергию ионов до 1200–1800 кэВ, двустороннее дистанционное управление от системы аналогово-цифровой связи по стекловолоконным каналам и предназначена для глубокой имплантации ионов в полупроводниковые пластины.

Установка "Везувий-8" (рис. 56) состоит из источника ионов 13, электромагнитного масс-сепаратора 12, устройства магнитного сканирования 11, системы однозакорного ускорения 9, приемной камеры 4, вакуумной системы, а также систем электропитания, контроля и управления.

В качестве легирующих веществ используют фосфор, мышьяк, цинк, сурьму в твердом состоянии и бор – в газообразном (трехфтористый бор). Твердое вещество загружают в тигель и нагревают до температуры испа-

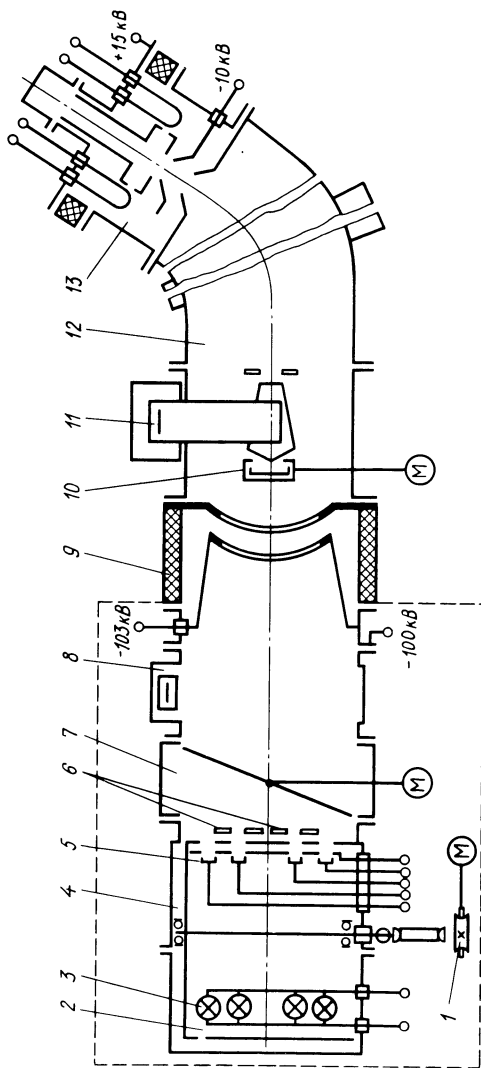


Рис. 56. Установка ионной имплантации "Везувий-8":

1 — привод вращения контейнера, 2 — нагреватель, 3 — контейнер с касетами, 4 — приемная камера, 5 — дозиметр, 6 — полупроводниковые пластины, 7 — вакуумный щелевой затвор, 8 — азотная ловушка, 9 — система одноосного ускорения, 10 — настроенный цилиндр Фарадея, 11 — устройство электромагнитного сканирования, 12 — электромагнитный масс-сепаратор, 13 — источник ионов

рения, а газообразное напускают через натекаТЕЛЬ непосредственно в газоразрядную камеру. Для повышения эффективности ионизации газов на пары вещества одновременно воздействуют дуговым разрядом и магнитным полем. В результате этого в источнике ионов образуется плазма, которую вытягивают с помощью трехэлектродной щелевой оптики, одновременно воздействуя магнитным полем. Образующийся ионный ток имеет значение в несколько миллиампер, т.е. значительно превышает (в 2–7 раз) ток, создаваемый другими промышленными установками ионной имплантации.

В установке "Везувий-8" вместо электростатического сканирования в горизонтальном и вертикальном направлениях применена комбинированная система сканирования: электромагнитное вертикальное отклонение ионного пучка и механическое горизонтальное вращение контейнера с полупроводниковыми пластинами.

В электромагнитном масс-сепараторе 12 ионы легирующего вещества движутся по криволинейным траекториям. При определенных значениях напряженности магнитного поля и энергии ионов радиус их движения зависит от массы. В результате в приемную камеру 4 попадает лишь вещество, предназначенное для легирования. Посторонние примеси (с другими массами ионов) как бы отфильтровываются масс-сепаратором. Таким образом, по принципу действия электромагнитный масс-сепаратор аналогичен обычному масс-спектрометру и обеспечивает высокую чистоту рабочего вещества, что является одним из достоинств ионного легирования.

Для ускорения ионного пучка до энергии 100 кэВ служит специальная система, представляющая собой два изолированных друг от друга электрода, один из которых находится под потенциалом земли, а на другой подается ускоряющее напряжение до 100 кВ. Одновременно этот электрод служит для создания потенциального барьера, препятствующего попаданию электронов из приемной камеры в ускоряющий промежуток, что снижает уровень рентгеновского излучения.

Приемная камера 4 предназначена для размещения в специальных контейнерах 3 полупроводниковых пластин, помещенных в кассеты, и их легирования. Общее количество пластин в контейнере изменяется в зависимости от их диаметра. Так, при диаметрах 75, 100 и 150 мм укладывают соответственно 100, 54 и 24 пластины. При легировании пластин контейнер вращается с частотой 0,32 1/с вокруг вертикальной оси. Равномерность и доза имплантации контролируются универсальным дозиметром 5.

Рабочий объем установки разделен щелевым затвором 7 на две части и откачивается паромасляным высоковакуумным агрегатом АВП 250/630. В приемной камере установки расположена ловушка 8, охлаждаемая жидким азотом.

Установка может работать в полуавтоматическом режиме по программе и в автоматическом с управлением от внешней ЭВМ. Достоинствами установки являются высокая производительность, равномерное распределение ионного пучка при большой площади полупроводниковых пластин, комбинированная система сканирования, возможность использования различных легирующих веществ и удобство обслуживания.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение электронных и ионных пучков?
2. Что такое элионная технология и каковы ее преимущества?
3. Какова последовательность операций при изготовлении диодов с использованием электронного пучка?
4. Каков принцип действия электронно- и ионно-лучевых установок?
5. Какие установки применяют для ионного легирования полупроводниковых пластин?

ГЛАВА ШЕСТАЯ. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НАРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ

§ 25. Общие сведения

Эпитаксия — это ориентированное осаждение из газовой фазы поверхностных слоев (пленок) каких-либо материалов с воспроизведением кристаллической структуры подложки. Применение в микроэлектронике полупроводниковых пластин с эпитаксиальными слоями значительно увеличивает выход годных приборов и микросхем. Кроме того, эпитаксией заменяют длительную многократную диффузию.

В отличие от диффузии при эпитаксии осаждаемые атомы не проникают в основной материал, а перемещаясь по поверхности подложки, занимают упорядоченное положение и становятся частью растущего слоя. Метод эпитаксии позволяет осаждать на кремниевые пластины (подложки) слой кремния, на германиевые — слой германия и арсенида галлия, а также наращивать на одну подложку несколько слоев, толщину и сопротивление которых можно легко регулировать. На такие диэлектрические материалы, как сапфир ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$), магниевая шпинель ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$) и оксид бериллия (BeO), можно осаждать монокристаллические слои кремния, что позволяет создавать новые типы приборов.

Кремний осаждают на подложки непосредственно из источника или разложением его соединений. Непосредственное осаждение выполняют испарением, сублимацией или реактивным распылением. В этом случае атомы кремния, сталкиваясь с поверхностью подложки, удерживаются на ней межатомными силами. При разложении (восстановлении в водородной среде) используют такие вещества, как SiCl_4 , SiBr_4 , SiHCl_3 .

Скорость роста эпитаксиального слоя зависит от кристаллографической ориентации подложки: она тем выше, чем больше отклонение поверхности подложки от направления $\langle 111 \rangle$. По грани (111) скорость роста наименьшая, а по грани (110) — наибольшая.

Как уже отмечалось, эпитаксиальный слой повторяет кристаллическую решетку подложки из кремния, германия или других материалов, которые могут иметь дефекты кристаллической решетки. Осаждаемый слой повторяет также несовершенства подложки. Наиболее значительными нарушениями являются краевые дислокации и дефекты упаковки, ямки травления.

В кристаллах кремния краевые дислокации образуются вследствие

несовершенства расположения атомов в отдельных областях кристаллической решетки и являются центрами осаждения инородных атомов или атомов примесей. При росте эпитаксиального слоя эти примеси движутся к дислокациям, в результате чего образуются его области с повышенным содержанием дефектов, ухудшающих в конечном счете электрические характеристики приборов.

Дефекты упаковки возникают при пропуске в процессе роста монокристалла кремния одного слоя атомов в кристаллической решетке или образовании дополнительного слоя. Этот дефект обычно проходит через всю толщину эпитаксиального слоя и может быть выявлен на его поверхности при травлении в виде замкнутых или незамкнутых треугольников, углов, линий и других фигур. Дефекты упаковки, как правило, образуются на границе между подложкой и растущим слоем, а также появляются в месте соединения двух неодинаково ориентированных зародышей в начальный период эпитаксии и на локальных поверхностных нарушениях кристаллической решетки.

При образовании ямок травления происходит встреча растущих зародышей, что способствует искажению решетки растущего слоя и появлению поликристаллических областей.

Для получения эпитаксиальных слоев с минимальным количеством дефектов необходимо, чтобы поверхность подложек была тщательно очищена, а плотность дислокаций была небольшой. Несмотря на предварительную обработку подложек, на их поверхностях остаются механические нарушения, островки диоксида кремния, пыль и другие загрязнения. Поэтому эпитаксиальный слой обычно имеет несколько больше дефектов, чем исходная полупроводниковая подложка. Загрязнения на подложках изменяют скорость роста слоя, способствуют образованию зародышей структурных несовершенств. Некоторые дефекты можно частично устранить предварительной (перед эпитаксиальным осаждением) в течение 40–90 мин термической обработкой подложек при 1300°С.

Качество эпитаксиальных слоев существенно зависит от степени концентрации легирующей примеси. Высокая концентрация примеси вызывает появление на поверхности пластин ямок травления в виде пирамид или конусов. При этом уменьшается скорость роста зародышей эпитаксиального слоя. При еще большей концентрации эпитаксиальный слой полностью покрывается пирамидами и конусами и при дальнейшем наращивании образуется поликристаллическая структура.

Условиями наращивания эпитаксиальных слоев с совершенной структурой, высокими электрофизическими свойствами и надежной воспроизводимостью являются стабильная подача в реакционную камеру парогазовой смеси (ПГС), точность регулирования ее компонентов, строжайшее выполнение требований производственной гигиены и чистоты процессов, а также правил работы с токсичными веществами.

Кроме наращивания эпитаксиальных слоев на всю поверхность подложек, возможна локальная эпитаксия, представляющая собой технологический процесс, при котором слой осаждают на отдельные (локальные) участки подложки, ограниченные защитным покрытием. Производственное освоение локальной эпитаксии позволит изготавливать планарные полупро-

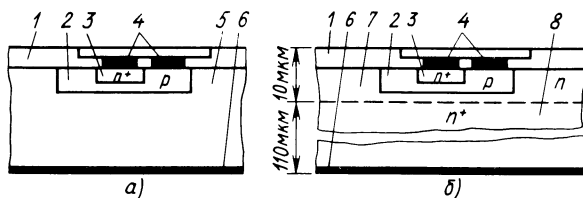


Рис. 57. Структуры планарного (а) и планарно-эпитаксиального (б) транзисторов:

1 — слой диоксида кремния, 2 — базовая область, 3 — эмиттерная область, 4 — невыпрямляющие контакты, 5 — полупроводниковая пластина, 6 — коллектор, 7 — эпитаксиальный слой, 8 — полупроводниковая подложка

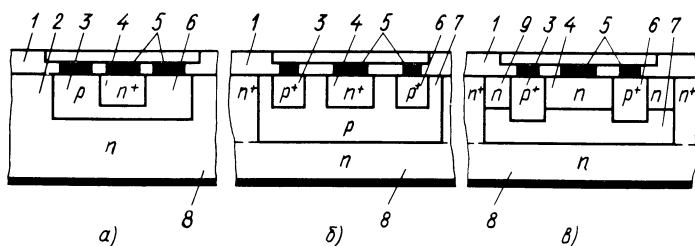


Рис. 58. Структуры полевых транзисторов, изготовленных двойной диффузией (а), однократной (б) и двукратной эпитаксией (в):

1 — слой диоксида кремния, 2 — полупроводниковая пластина, 3, 4, 6 — области истока, затвора и стока, 5 — невыпрямляющие контакты, 7, 9 — эпитаксиальные слои p - и n -типа, 8 — подложка

водниковые приборы и микросхемы СВЧ-диапазона из новых полупроводниковых материалов, имеющих высокие электрические параметры.

Для сравнения на рис. 57, а, б показаны две структуры транзисторов, изготовленные двойной диффузией, а также эпитаксией и диффузией.

Транзистор должен обладать высоким пробивным напряжением коллектор — база и малым напряжением насыщения коллектор — эмиттер. Высокое пробивное напряжение транзистора обеспечивается высокоомным коллектором. Однако это одновременно увеличивает последовательное сопротивление коллектора и напряжение насыщения коллектор — эмиттер, которое можно снизить уменьшением толщины высокоомной пластины, сделав ее тоньше 120 мкм. Между тем провести две диффузии в тонкие пластины трудно, так как они хрупки и легко ломаются. Выход годных транзисторов при этом очень низок.

Высокое пробивное напряжение коллектор — база и малое напряжение коллектор — эмиттер транзисторов можно получить сравнительно просто эпитаксией и диффузией на пластинах толщиной 120 мкм и более. Для этого на низкоомную подложку наращивают эпитаксиальный высокоом-

ный слой, служащий коллектором. Так как этот слой в 11 раз тоньше подложки, последовательное сопротивление коллектора будет незначительным, что позволяет создавать транзисторы с необходимыми параметрами.

Двойной диффузией также сложно изготовить полевой транзистор с равномерным распределением примеси в области канала (рис. 58, а). Проще это сделать, если применить однократную эпитаксию (рис. 58, б). Для этого на подложку n -типа наращивают эпитаксиальный слой p -типа, который служит областью канала и способствует равномерному распределению примеси. После этого последовательно диффузией создают определяющий толщину канала затвор, а затем исток и сток.

Кроме того, канал полевого транзистора может быть изготовлен эпитаксией (рис. 58, в). Один эпитаксиальный высокоомный слой p -типа служит для создания с высокой точностью легирования канала, а второй низкоомный n -типа, расположенный над первым, точно ограничивает толщину канала, поперечные размеры которого определяются при изготовлении истока и стока диффузией.

§ 26. Технология наращивания эпитаксиальных слоев

Эпитаксия начинается с подготовки поверхности подложек. После механической обработки полупроводниковых пластин (ориентированной резки, шлифовки и полировки) шероховатость их поверхностей минимальна и равна сотым долям микрометра. В реакционной камере установки эпитаксиального наращивания полупроводниковые пластины (подложки) для очистки предварительно нагревают до температуры их кристаллизации в течение 5 мин в среде очищенного водорода. Следует отметить, что качество водорода должно быть высоким. Примеси кислорода и водяных паров могут стать причинами образования грубой, покрытой ямками поверхности эпитаксиального слоя и увеличения плотности дефектов упаковки.

Затем в поток очищенного водорода с определенной скоростью турбулентно подают обезвоженный хлористый водород HCl . Скорость травления подложек хлористым водородом прежде всего зависит от его качества и концентрации в водороде. Так, при 1200°C и концентрации HCl от 1 до 5% скорость травления составляет $0,5 - 2$ мкм/мин. После травливания с подложек необходимого слоя начинают эпитаксиальное наращивание, при котором в поток водорода вводят необходимые компоненты (реагенты). Смесь водорода с парами реагентов называют парогазовой смесью (ПГС). Различные примеси в хлористом водороде изменяют скорость травления. Так, углекислый газ CO_2 снижает скорость травления и является источником образования в ПГС водяного пара, а C_2H_2 окрашивает поверхность подложек или делает ее матовой.

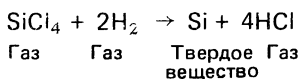
В качестве травителей можно использовать и другие вещества, например иодистый HI и бромистый HBr водород, а также водяной пар. После хлористого водорода наиболее широко применяют травление в парах воды, так как реакция между водой и кремнием необратима. При определенных условиях кремний окисляется, образуя диоксид SiO_2 и летучий монооксид SiO . Монооксид кремния уносится ПГС, а диоксид вступает в реакцию с кремнием и вновь образуется летучий монооксид. При содержании паров

воды в ПГС от 0,02 до 0,1%, его расходе 6—20 л/ч и температуре подложек 1270°С скорость травления составляет до 5 мкм/ч. Плотность дефектов упаковки эпитаксиальных слоев после травления снижается до 10 см⁻², т.е. уменьшается более чем в 100 раз по сравнению с необработанными подложками.

Эпитаксиальные слои кремния получают осаждением вещества из газовой фазы в реакторе или под колпаком вакуумной установки.

При осаждении из газовой фазы исходными веществами могут быть тетрахлорид SiCl₄ и тетрабромид SiBr₄ кремния, трихлорсилан SiHCl₃, силан SiH₄ и др. Для получения эпитаксиального слоя с заданным удельным сопротивлением необходимо при осаждении кремния вводить в газовую фазу определенное количество легирующей примеси, в качестве которой используют элементы III и V групп периодической системы Д.И. Менделеева.

Осаждение эпитаксиальных слоев из газовой фазы восстановлением тетрахлорида кремния водородом обеспечивает их высокое качество и довольно широкое распространение в микроэлектронике. При этом водород одновременно выполняет роль газа-носителя. Процесс осаждения происходит по следующей реакции:



Эпитаксию проводят при 1150—1300°С на установке (рис. 59), имеющей горизонтальную реакционную камеру 1, подставку 5, нагреватель (индуктор) 2, газовый блок и трубопроводы, соединяющие все элементы в герметичную систему. Применяемые для легирования такие вещества, как фосфин PH₃, диборан B₂H₆, арсин AsH₃, ядовиты, поэтому отходящие после реакции из эпитаксиальной установки продукты удаляются специальной вытяжной системой 4.

Парогазовая смесь образуется при прохождении водорода над жидким тетрахлоридом кремния или водород частично пропускают через жидкость (метод барботирования). Для поддержания необходимой скорости потока тетрахлорида кремния и его концентрации скорость истечения и темпера-

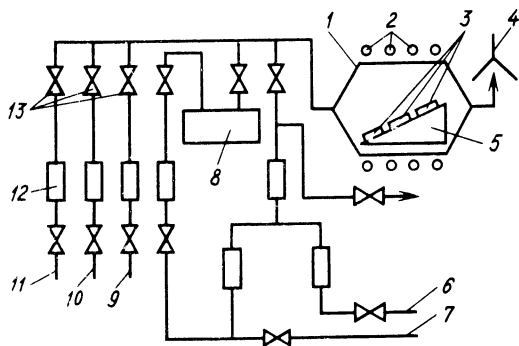


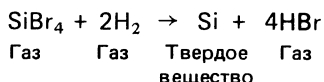
Рис. 59. Схема горизонтальной установки наращивания эпитаксиальных слоев осаждением из газовой фазы в реакционной камере:

1 — реакционная камера, 2 — индуктор, 3 — подложки, 4 — зонт вытяжной системы, 5 — подставка, 6, 7, 9, 10, 11 — трубопроводы подачи легирующего соединения водорода, углекислого газа, паров соляной кислоты и азота (или водорода), 8 — барботер-дозатор, 12 — ротаметр, 13 — вентиль

тура водорода должны быть постоянными. Температуру водорода (обычно нулевую) поддерживают с помощью жидкого азота, твердой углекислоты, тающего льда и др. Легирующее вещество должно иметь концентрацию от $5 \cdot 10^{-4}$ до 1% в водороде и вводится в смесь водород – тетрахлорид кремния непосредственно на установке эпитаксии.

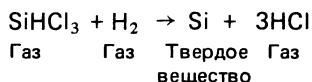
Скорость наращивания и качество эпитаксиальных слоев зависят от температуры нагрева подложек, концентрации тетрахлорида кремния и легирующей примеси в водороде, скорости потока ПГС, длительности процесса эпитаксии и особенностей конструкции установки.

При восстановлении тетрабромид кремния SiBr_4 водородом процесс осаждения происходит по следующей реакции:



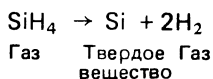
Так как при восстановлении тетрабромид кремния требуется меньше энергии, чем при восстановлении тетрахлорида кремния, процесс проводят при температуре около 1050°C . Этим методом получают однородные воспроизводимые эпитаксиальные слои с резким перепадом концентрации примесей.

Восстановление трихлорсилана SiHCl_3 водородом происходит по следующей реакции:



До температуры 1220°C рост эпитаксиального слоя идет с увеличением скорости, а затем замедляется.

Эпитаксиальные слои можно получать также пиролитическим разложением силана SiH_4 при температуре около 1000°C по следующей реакции:



Так как силан самовоспламеняется и взрывоопасен, его пиролиз требует внимательного обслуживания установок эпитаксии. Обычно для уменьшения опасности самовоспламенения разбавляют силан водородом или инертным газом. При концентрации силана более 5% с ним можно обращаться, как с водородом. По этой же причине установку эпитаксии сначала откачивают, удаляя из нее влагу и воздух, затем напускают водород, а далее проводят процесс по принятой технологической схеме. Пиролитическим разложением силана получают эпитаксиальные слои с резкими перепадами концентрации примесей.

Вакуумное осаждение эпитаксиальных слоев выполняют методами молекулярных пучков (испарения) и возгонки. При этом происходит непосредственный перенос кремния (германия) от источника к подложке.

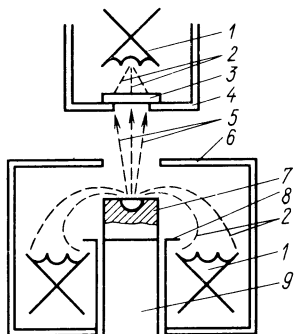


Рис. 60. Схема установки наращивания эпитаксиальных слоев кремния вакуумным испарением:

1 — электронно-лучевые источники, 2 — электронный пучок, 3 — подложка кремния, 4 — держатель подложки, 5 — пары кремния, 6, 8 — экраны, 7 — слиток кремния, 9 — водоохлаждаемая подставка

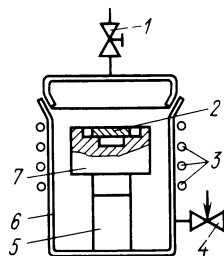


Рис. 61. Схема установки наращивания эпитаксиальных слоев кремния возгонкой в вакууме:

1 — вентиль соединения с системой откачки, 2 — кремниевая подложка, 3 — ВЧ-индуктор, 4 — натекаль, 5 — кварцевая подставка, 6 — реакционная камера (кварцевый сосуд), 7 — источник кремния

Осаждение эпитаксиальных слоев кремния испарением выполняют на специальной установке (рис. 60) с двумя электронно-лучевыми источниками 1, один из которых служит для нагрева кремниевой подложки 3, а другой — для испарения слитка 7 кремния. При работе установки сфокусированный до диаметра 3 мм электронный пучок 2 расплавляет локальный участок в слитке 7 кремния, находящегося на водоохлаждаемой заземленной подставке 9. Подложка 3 нагревается до 1200°C , а слиток (место расплава) на несколько сотен градусов выше температуры плавления кремния.

В начальный период при интенсивной работе вакуумной системы установки для удаления загрязненного поверхностного слоя со слитка кремния испарение происходит вхолостую. Затем конденсируют пары 5 кремния на предварительно подготовленную и очищенную от оксидов кремниевую подложку 3, закрепленную в держателе 4 и находящуюся над источником кремния, соединенным с положительным потенциалом. Процесс выполняют при давлении $10^{-5} - 10^{-8}$ Па. Эпитаксиальный слой растет со скоростью до 4 мкм/мин и имеет минимальное количество дефектов.

Установка вакуумного осаждения эпитаксиальных слоев кремния возгонкой (сублимацией) показана на рис. 61. Реакционная камера 6 установки представляет собой находящийся под вакуумом (10^{-6} Па) кварцевый сосуд, внутри которого расположены источник кремния 7 и подложка 2, нагреваемые высокочастотным индуктором 3. Кремний нагревают пример-

но до 1350°C , а подложку — до 1100°C . Рост эпитаксиального слоя идет со скоростью до $0,3$ мкм/мин. Стационарный режим возгонки устанавливается через несколько часов после начала процесса.

§ 27. Контроль и измерение параметров эпитаксиальных слоев

Основными контролируемыми параметрами эпитаксиальных слоев являются: распределение легирующей примеси по глубине (профилю); удельное электрическое сопротивление; количество дефектов упаковки и дислокаций; высота локальных выступов; толщина; поверхностное сопротивление; пробивное напряжение.

Распределение легирующей примеси по глубине эпитаксиального слоя контролируют методами анодирования, двойной сошлифовки, вольт-емкостным и радиоактивным.

Для изготовления полупроводниковых приборов и микросхем с различными параметрами, как правило, необходимо, чтобы распределение легирующей примеси по глубине эпитаксиального слоя было равномерным. Между тем в производстве могут использоваться эпитаксиальные слои с неравномерным распределением легирующей примеси по глубине.

При методе анодирования измеряют первоначально удельное сопротивление эпитаксиального слоя, анодируют его и удаляют полученный оксид в плавиковой кислоте. Толщину удаленного слоя определяют по изменению массы подложки. Средняя электрическая проводимость удаленного слоя $\sigma = (1/\rho_{s1} - 1/\rho_{s2}) 1/\Delta t$ (где ρ_{s1} и ρ_{s2} — поверхностные сопротивления слоя до и после анодирования; Δt — толщина удаленного слоя). Определяя среднюю электрическую проводимость несколько раз, строят кривую, по которой легко рассчитывают распределение примеси по профилю слоя (концентрацию носителей заряда).

При методе двойной сошлифовки берут две пластины: одну с эпитаксиальным слоем — исследуемую и другую без эпитаксиального слоя — эталонную с известной концентрацией примеси. Пластины с эпитаксиальным слоем сошлифовывают под небольшим углом к поверхности. Затем в обе пластины одновременно и в одинаковых условиях проводят диффузию примеси, создающей противоположный тип электропроводности. В пластине без эпитаксиального слоя определяют глубину залегания электронно-дырочного перехода с помощью косого шлифа. Пластины с эпитаксиальным слоем шлифуют вторично под углом 90° к плоскости первой сошлифовки, окрашивают шлиф травлением в кислоте, анализируют его, измеряя глубину расположения электронно-дырочного перехода.

При этом устанавливают, что ширина диффузионной области мало изменяется вдоль границы первой сошлифовки и эквивалентна глубине залегания электронно-дырочного перехода, что видно после второй сошлифовки. В результате делают вывод о том, что концентрация примеси почти постоянна по глубине и, следовательно, постоянно удельное сопротивление эпитаксиального слоя.

Следует знать, что поверхностные концентрации примеси в пластине с эпитаксиальным слоем и в эталонной после диффузии одинаковы, а также что в плоскости электронно-дырочных переходов концентрация некомпен-

сированной примеси равна нулю. Пользуясь определенными зависимостями, рассчитывают концентрации примеси в пластине с эпитаксиальным слоем и эталонной.

Вольт-емкостный метод состоит в определении концентрации примеси в зависимости от емкости электронно-дырочного перехода, созданного диффузией или сплавлением, и приложенного к нему обратного напряжения.

Радиоактивный метод определения распределения примеси в эпитаксиальном слое заключается в следующем. Бомбардируют пластину с эпитаксиальным слоем нейтронами, после чего травят ее в плавиковой и азотной кислотах, переносят этот травитель на фильтровальную бумагу, пропитанную едким натром, сушат, а затем счетчиком Гейгера—Мюллера определяют интенсивность β -распада. Интенсивность излучения травленного слоя сравнивают с эталонной. На основе нескольких таких травлений, выполненных на различной глубине эпитаксиального слоя (о чем судят по потере массы пластины), строят профиль концентрации примеси.

Удельное электрическое сопротивление эпитаксиальных слоев определяют методами, описанными в § 20.

Количество дефектов упаковки и дислокации эпитаксиальных слоев обычно оценивают с помощью оптической микроскопии. Вначале пластины подвергают химическому травлению: в местах выхода дефектов на поверхность эпитаксиального слоя вытравливаются различные фигуры, имеющие форму треугольников, одиночных и V-образных линий, а в местах выхода дислокаций — ямки в виде треугольных пирамид. Плотность дефектов упаковки и дислокаций определяют делением их количества на площадь образца. Подсчет ведут визуально, используя микроскоп (ММУ-1, МИМ-7 или МИМ-8М).

Кроме того, необходимо определить тип электропроводности эпитаксиальных слоев (термозондом или по форме вольт-амперной характеристики), плотность дефектов в них (под микроскопом МБС-1, МБС-2 или МБС-9) и шероховатость (под интерференционным микроскопом МИИ-4).

Высоту локальных выступов на поверхности эпитаксиальных слоев определяют на микроинтерферометре Линника МИИ-4 с точностью от 0,03 до 1 мкм. Сущность метода состоит в измерении смещения интерференционных полос, попавших на выступ. Прибор измеряет смещение интерференционных полос с точностью 0,1 интервала между ними. Зная изгиб ΔN полосы, который также определяется в долях интервала между двумя интерференционными полосами, рассчитывают высоту (мкм) выступов $h = 0,27\Delta N$.

Толщину эпитаксиального слоя на структурах типа $n-n^+$, $p-p^+$ и $p-n^+$ измеряют на спектрофотометре методом интерференции ИК-излучения. Исследуемые образцы должны иметь удельное сопротивление эпитаксиального слоя не менее 0,1 Ом·см, подложки — не более 0,015 Ом·см, а толщина эпитаксиального слоя должна быть в пределах 50—60 мкм. Вначале, пользуясь спектрами поглощения веществ с известными характеристическими линиями, определяют калибровочный коэффициент спектрофотометра и проверяют настройку прибора по эталонным образцам. Затем снимают спектрограмму, обрабатывают ее и рассчитывают толщину эпитаксиального слоя.

Толщину эпитаксиального слоя на структурах типа p - n , n - p^+ и n - p определяют методом косого шлифа (см. § 20).

Поверхностное сопротивление эпитаксиальных слоев определяют так же, как диффузионных (см. § 20). Одновременно рассчитывают удельное сопротивление эпитаксиального слоя, которое равно произведению его поверхностного сопротивления на толщину. Наличие высокоомного переходного слоя между эпитаксиальным слоем и подложкой на структурах типа n - p^+ обнаруживают четырехзондовым методом, измеряя падение напряжения на нем, которое должно быть значительно меньше падения напряжения на эпитаксиальном слое. Обычно переходный слой имеет удельное сопротивление более 10^3 Ом·см или обладает дырочной электропроводностью.

Пробивное напряжение эпитаксиальных структур типа n - p^+ , имеющих p - n -переход, определяют визуально на экране осциллографа по вольт-амперной характеристике, фиксируя момент наступления пробоя на границе эпитаксиальный слой — подложка при медленном увеличении обратного напряжения.

Согласно техническим условиям (ТУ) при маркировке кремниевых пластин с эпитаксиальными слоями указывают в числителе характеристику эпитаксиального слоя, а в знаменателе — подложки (пластины). Например,

обозначение $\frac{76\ 10\ \text{КДБ}\ 0,5/\text{IA}}{380\ 3\text{Б}2\ \text{лу}\ \text{КЭС}\ 0,01}$ расшифровывают так: 76 — диаметр струк-

туры, мм; 10 — номинальная толщина эпитаксиального слоя, мкм; КДБ — материал слоя (кремний дырочного типа электропроводности, легированный бором); 0,5 — номинальное удельное сопротивление, Ом·см; I — группа структуры; А — индекс (эти два последних обозначения находят в таблицах, прилагаемых к ТУ); 380 — номинальная толщина подложки, мкм; 3Б2 лу КЭС 0,01 — обозначение материала подложки согласно другим ТУ.

§ 28. Оборудование для наращивания эпитаксиальных слоев

Установки для наращивания эпитаксиальных слоев работают по одному принципу, но отличаются конструктивным исполнением и возможностями.

Так, установка УНЭС-2П-В с двумя реакционными камерами (рис. 62) имеет восьмиканальное программное устройство, позволяющее автоматизировать наиболее важные операции (нагрев, отжиг, газовое травление, охлаждение, наращивание эпитаксиального слоя и нанесение слоя диоксида кремния), а также повысить производительность труда. При выполнении в одной реакционной камере вспомогательных операций, связанных с подготовкой к наращиванию эпитаксиальных слоев, в другой камере в автоматизированном цикле по заданной программе проводят эпитаксию.

Восьмиканальное программное устройство обеспечивает задание времени в каждом канале от 1 до 99 мин с интервалом через 1 мин и выдачу команд на 13 исполнительных органов. Программа задается перестановкой штекеров на наборном поле. После включения и отключения установки заданная программа полностью воспроизводится программным устройством.

Для наращивания эпитаксиальных слоев применяют также установки УНЭС-2П-КС и УНКС, имеющие более высокую производительность реакционных камер, чем установка УНЭС-2П-В, позволяющие обрабатывать подложки диаметром 60 мм и экономить электроэнергию, так как они оборудованы металлическими отражающими экранами, машинными генераторами и резистивными нагревателями.

На основе установки УНЭС-2П-В создана установка УНЭС-2П-КА, оснащенная электронными датчиками расхода реагентов и управляемая ЭВМ, что позволяет использовать ее в автоматизированной системе управления технологическим процессом эпитаксии (АСУТП). Многоканальный программатор обеспечивает работу этой установки в автоматическом режиме при наращивании эпитаксиальных поликристаллических и диэлектрических слоев. Вертикальное расположение реакторов — реакционных камер (рис. 63) с вращением подложкодержателя создает условия для осаждения слоев высокой однородности при незначительных расходах электроэнергии и водорода.

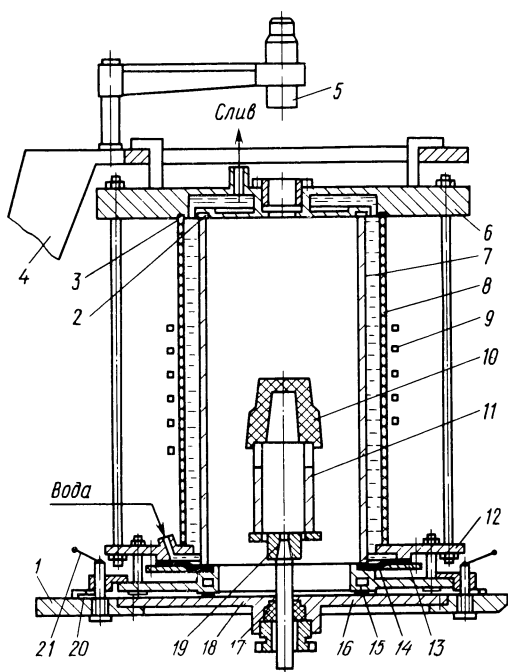


Рис. 62. Реакционная камера установки наращивания эпитаксиальных слоев УНЭС-2П-В:

1 — основание, 2, 3, 13, 14, 16 — уплотнения, 4 — кронштейн, 5 — оптический пирометр, 6, 12 — верхний и нижний фланцы, 7, 8 — кварцевая и пластмассовая (оргстекло) трубы, 9 — ВЧ-индуктор, 10 — подложкодержатель, 11 — подставка, 15, 18 — фланцы основания, 17 — прокладка, 19 — центрирующая втулка, 20 — микровыключатель, 21 — зажим

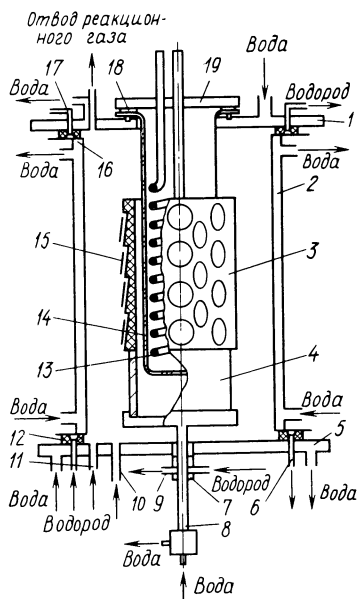


Рис. 63. Реакционная камера установки наращивания эпитаксиальных слоев УНЭС-2П-КА:

1, 19 — верхний и нижний фланцы, 2 — цилиндр, 3 — подложкодержатель, 4 — подставка, 5 — основание, 6, 9, 10, 11, 17 — штуцера, 7 — манжета, 8 — водоохлаждаемый вал, 12, 16 — прокладки, 13 — ВЧ-индуктор, 14 — кварцевая колба, 15 — подложки, 18 — уплотнение

При работе установок в АСУТП поступают электрические сигналы от нескольких датчиков контроля технологических параметров: расхода водорода (основного, через испаритель, через дозатор с гидридом примеси); концентрации тетрахлорида кремния в водороде; температуры нагрева подложек; времени роста эпитаксиального слоя; расхода примеси и ее температуры.

Установка 02ЭИК-100-003 (УНЭС-122), оснащенная микропроцессорной системой управления технологическим процессом, предназначена для осаждения из газовой фазы тонких эпитаксиальных структур кремния пониженной дефектности на кремниевые пластины с использованием лучистого нагрева. Информация о техническом состоянии установки и параметрах технологического процесса отражается на экране дисплея. Кроме того, в системе управления имеется канал связи для подключения установки к управляющей ЭВМ. Один кварцевый цилиндрический реактор служит для наращивания эпитаксиальных слоев на полупроводниковые пластины диаметром 76, 100 и 125 мм с нагревом их галогенными лампами и поддержанием температуры в рабочей зоне 1000–1250°С с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$.

Как известно, качество эпитаксиальных слоев зависит не только от совершенства структуры подложек и состояния их поверхностей но и от конструкции установок эпитаксиального наращивания, основными элементами которых являются реакторы (реакционные камеры), нагреватели и дозаторы.

Реакторы. Реакционные камеры можно разделить по расположению подложкодержателей на горизонтальные и вертикальные, по методу нагрева — на высокочастотные (индукционные), инфракрасные и резистивные, по способу подачи ПГС — с отражением и с непосредственной подачей, а по материалу — из кварца, нержавеющей стали, керамики. С точки зрения технологии осаждения эпитаксиальных слоев интерес представляет классификация по способу подачи ПГС.

Реакционные камеры, в которых ПГС подается с отражением, показаны на рис. 64, а–в.

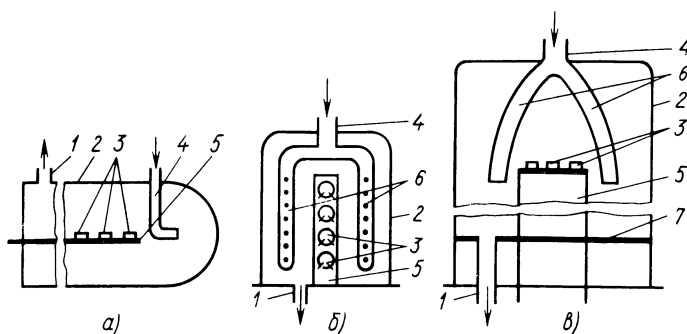


Рис. 64. Схемы реакционных камер с подачей ПГС с отражением: а — горизонтальная, б, в — вертикальные; 1, 4 — выпускное и впускное отверстия, 2 — корпус камеры, 3 — подложки, 5 — подложкодержатели, 6 — распределительный ввод, 7 — нижний торец

В горизонтальной реакционной камере (рис. 64, а) при подаче ПГС по центру полусферы создается его отраженный поток, параллельный подложкам.

В вертикальной реакционной камере (рис. 64, б) ПГС подается через распределительный подогреваемый ввод, а отражается его поток от боковых поверхностей. Предварительный подогрев ПГС до температуры на 50–300°С ниже рабочей способствует повышению выхода осаждаемого вещества. Подача ПГС тангенциально к отражающей поверхности улучшает турбулентность и гомогенность потока, а следовательно, условия формирования эпитаксиального слоя.

В вертикальной реакционной камере (рис. 64, в) ПГС через двойной ввод подается к нижнему ее торцу, от которого происходит отражение и некоторое перемешивание потока перед осаждением на подложки.

В рассмотренных камерах нагреватели, одновременно являющиеся подложкодержателями 5, закреплены неподвижно. Поэтому равномерные по составу эпитаксиальные слои можно получить подбором температуры нагрева подложек и расхода ПГС, применением рациональной формы подложкодержателей и реакционных камер.

Вертикальные реакционные камеры, в которых ПГС подается непосредственно в зону осаждения эпитаксиальных слоев, показаны на рис. 65, а–в.

В реакционной камере без распределительного ввода (рис. 65, а) ПГС, поступая сверху непосредственно на подложки, удаляется через боковой патрубок. В реакционной камере, показанной на рис. 65, б, подача ПГС также производится сверху, но через распределительный ввод, а удаление – снизу.

Особенностью реакционной камеры, показанной на рис. 65, в, является подача и удаление ПГС снизу.

Нагреватели. В производстве изделий микроэлектроники довольно широко используют высокочастотный (ВЧ), или индукционный, нагрев, так как он не требует сложного и дорогостоящего оборудования: достаточно иметь ВЧ-генератор и трубчатый водоохлаждаемый свернутый в спираль индуктор. Подложки нагреваются теплотой графитового подложкодержателя, в котором наводятся индуктивные токи. Измеряют температуру нагрева подложек оптическим пирометром, точность которого довольно низка ($\pm 20^\circ\text{C}$).

Более распространен резистивный нагрев, при котором нагреватель одновременно является подложкодержателем. Такой нагреватель может быть выполнен в виде пластины, диска, стержня и иметь горизонтальное (наклонное) или вертикальное расположение рабочей поверхности (места

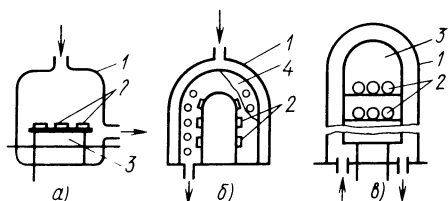


Рис. 65. Схемы вертикальных реакционных камер с подачей ПГС непосредственно в зону осаждения без распределительного ввода (а), с ним (б) и с нижним удалением ПГС (в):

1 — реакционная камера, 2 — подложки, 3 — подложкодержатели (подставки), 4 — распределительный ввод

укладки подложек). При горизонтальном расположении подложек их не закрепляют, а при вертикальном закрепляют, используя штифты, буртики, гнезда, прижимы. На вертикальном нагревателе-подложкодержателе подложки можно в зависимости от его формы закреплять с двух сторон и более. Это является достоинством вертикальных нагревателей. Для подложек большого диаметра (50–80 мм) используют нагреватели с гнездами, диаметр которых несколько меньше диаметра подложек. При этом контактирование с подложкодержателем создается только по узкой периферийной области подложки, что способствует выравниванию температуры по всей ее площади. Вертикальные подложкодержатели необходимо довольно часто очищать, так как крепежные детали покрываются слоем полупроводникового материала и теряют способность надежного фиксирования.

Особенно важно обеспечивать в процессе эпитаксии надежный тепловой контакт между подложкодержателем и подложкой по всей поверхности. Нарушение этого контакта приводит к образованию локальных областей на подложках с различной температурой. Подложкодержатели-нагреватели с горизонтальным и вертикальным расположением подложек показаны на рис. 66, а–в.

В нагревателе, показанном на рис. 66, а, представляющем собой изогнутую металлическую пластину 2 с двумя параллельными полками, усеченными по концам, подложки располагают только на верхней полке. При прохождении тока происходит компенсация потерь теплоты на верхней (рабочей) полке за счет ее поступления с нижней. Усеченные концы нагревателя увеличивают его рабочую зону и устраняют градиент температуры по длине.

В нагревателе, показанном на рис. 66, б, электрический ток пропускают непосредственно через надрезанные полупроводниковые слитки 3 — подложки. При этом более интенсивно нагреваются не перемычки, а подложки, так как они имеют меньшее поперечное сечение. После окончания процесса эпитаксии слитки дорезают. Существенным недостатком нагревателей такой конструкции являются значительные дефекты поверхности подложек

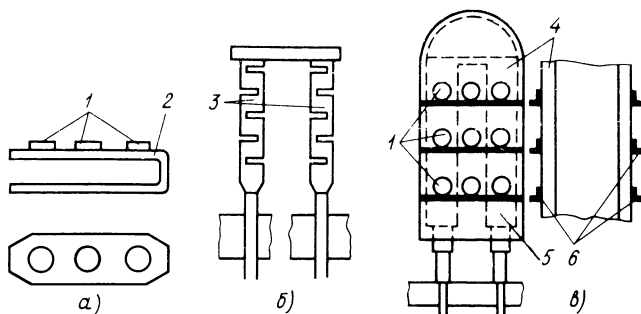


Рис. 66. Нагреватели-подложкодержатели с горизонтальным (а, б) и вертикальным (в) расположением подложек:

1 — подложки, 2, 5 — металлическая и графитовая пластины, 3 — надрезанный слиток полупроводника, 4 — кварцевая оболочка, 6 — полочки

после прорезки пазов в слитках алмазным диском, что не позволяет получать эпитаксиальные слои высокого качества.

Нагреватель, показанный на рис. 66, в, выполнен в виде П-образной вертикально расположенной графитовой пластины 5 прямоугольного сечения, через которую пропускают ток, и надетой на нее тонкой кварцевой оболочки 4 с полочками 6 для установки подложек. Такие комбинированные нагреватели создают перепад температур от подложки к подложке не более 5°C при температуре процесса около 830°C и применяются для низкотемпературной эпитаксии германия.

Дозаторы. В производстве изделий микроэлектроники ПГС готовят тремя способами: барботажным, испарением реагента с поверхности и объемным. Устройства, с помощью которых готовят ПГС, называют дозаторами (испарителями).

В барботажных дозаторах ПГС образуется при пропускании газа-носителя через жидкий слой испаряемого вещества. Количество в ПГС испаряемого вещества зависит от его уровня, а также от температуры, степени измельчения пузырьков и расхода газа-носителя. Оптимальным считают расстояние от поверхности трубки, из которой выходит водород (газ-носитель), до поверхности, например испаряемого тетрахлорида кремния, равное 20–30 мм. При повышении уровня жидкости наступает момент полного насыщения пузырьков водорода парами реагента и ПГС приобретает концентрацию, близкую к равновесной при данной температуре. Следует при этом учитывать возрастающее противодавление столба жидкости потоку газа-носителя.

Простейший барботажный дозатор (рис. 67, а) представляет собой закрытый цилиндр 1 с двумя трубками 2, одна из которых — длинная — служит для подачи газа-носителя, а другая — короткая — для заливки жидкого реагента и отбора ПГС.

Более сложен по конструкции барботажный дозатор с поплавком (рис. 67, б), имеющим симметрично расположенные и погруженные в жидкость концы трубок 2 для подачи газа-носителя. По мере снижения уровня тетрахлорида кремния поплавок опускается, обеспечивая постоянный уровень погружения трубок. Наличие нескольких трубок препятствует перекосу поплавка.

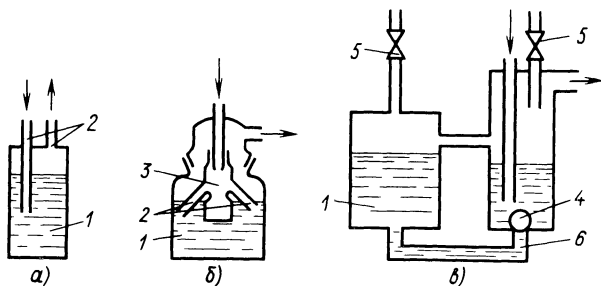


Рис. 67. Барботажные дозаторы:

а — простейший, б — с поплавком, в — с шариковым клапаном; 1 — реагент, 2, 6 — трубки, 3 — поплавок, 4 — шариковый клапан, 5 — вентиль

Барботажный дозатор, показанный на рис. 67, в, имеет две емкости и предназначен для получения ПГС из компонентов с разными скоростями испарения. Чтобы исключить интенсивное испарение жидкости с высоким давлением паров, ее подают из левой емкости через трубку 6 в правую. Шариковый клапан 4 препятствует обратному перетеканию жидкости в левую емкость. Обогащение испаряемой смеси более летучим компонентом происходит вследствие уравнивания гидростатических уровней в камерах дозатора.

Для таких дозаторов важен подбор оптимального соотношения площадей камер, зависящий от испарительной способности находящихся в них компонентов смеси. Если плотности жидкостей различны, то их уровни в камерах не будут одинаковы. Образование пузырьков газа-носителя над поверхностью жидкости способствует гомогенизации ПГС.

Недостатками барботажных дозаторов являются образование тумана испаряемой жидкости, вынос (и конденсация) ее в трубопроводы и попадание капелек в реакционную камеру, что может быть причиной брака эпитаксиальных слоев. Кроме того, при колебаниях расхода газа-носителя через дозатор возможно укрупнение пузырьков и соединение их в газовый шнур, особенно при испарении высоковязких реагентов. Для стабилизации состава ПГС в некоторых барботажных дозаторах делают множество калиброванных отверстий малого диаметра (0,1–0,2 мм), что способствует равномерному истечению через них газа-носителя и образованию мелких пузырьков по всей рабочей поверхности.

В испарительных дозаторах ПГС образуется при прохождении газа-носителя над поверхностью жидкости. Для получения на одной подложке эпитаксиальных слоев различного типа электропроводности используют дозаторы с жиклером, коаксиальные и прямоточные (рис. 68, а–в).

Дозатор с жиклером (рис. 68, а) предназначен для приготовления большого количества ПГС и имеет две трубки для газа-носителя: через одну с жиклером 2 пропускают 95–98% газа-носителя прямотоком, а через другую 1 оставшийся проходит над поверхностью испаряемого реагента 5. Раз-

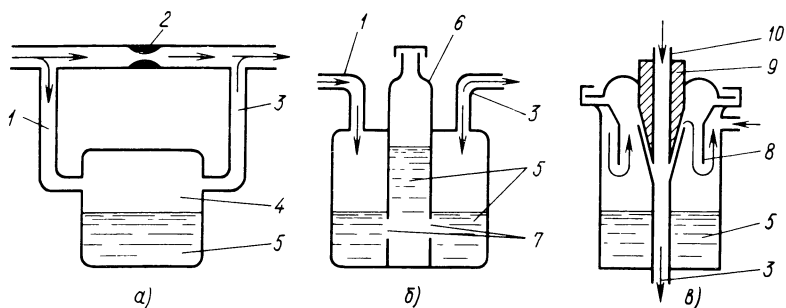


Рис. 68. Испарительные дозаторы:

а — с жиклером, б — коаксиальный, в — прямоточный с цилиндрическим экраном; 1, 3 — входная и выходная трубки, 2 — жиклер, 4 — корпус, 5 — реагент, 6 — коаксиальная емкость, 7 — отверстия, 8 — цилиндрический экран, 9 — конус, 10 — прямоточный канал

деление газового потока происходит вследствие создания в трубке с жиклером газового сопротивления. Насыщенный парами реагента 5 газ после прохода над поверхностью жидкости, поступая по трубке 3, смешивается с основным потоком газа-носителя и в виде ПГС идет в реакционную камеру. Достоинством таких дозаторов являются создание постоянной концентрации ПГС, так как при изменении расхода газа-носителя через трубку с жиклером автоматически изменяется количество газа-носителя, проходящего над поверхностью реагента.

Коаксиальный дозатор (рис. 68, б) имеет устройство автоматической подготовки ПГС и обеспечивает при работе постоянный уровень испаряемой жидкости с сохранением заданной концентрации смеси.

В прямоточном дозаторе с цилиндрическим экраном 8 (рис. 68, в) при увеличении времени контакта газа-носителя с поверхностью реагента 5 повышается концентрация ПГС. Смешивание насыщенного газа с газом-носителем происходит в прямоточном канале 10 при изменении зазора между конусом 9 и его седлом. Если собрать в одну вертикальную стойку несколько таких дозаторов, можно наращивать многослойные эпитаксиальные структуры из различных реагентов, выполняя независимую регулировку состава ПГС.

Общим недостатком всех барботажных и испарительных дозаторов является невозможность их использования в АСУТП, так как они не имеют электрических вводов и конструктивно не приспособлены для управления расходом реагента в процессе работы.

Объемные дозаторы работают на принципе полного испарения реагента, имеющего постоянную скорость истечения из отверстия малого диаметра (рис. 69, а—в).

Дозатор с газовым подпором (рис. 69, а) работает следующим образом. Давлением одного потока газа-носителя (водорода) реагент из камеры 3 поднимается по трубке 4 и разливается по спиральной канавке на поверхности конуса 5, откуда уносится в реакционную камеру 6 другим

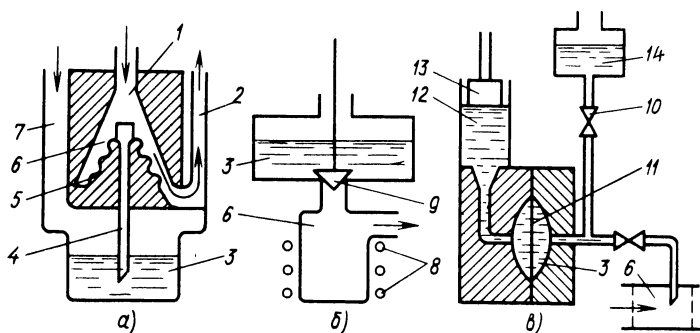


Рис. 69. Объемные дозаторы:

а — с газовым подпором, б — капельный, в — поршневой с мембраной; 1, 2 — входное и выходное отверстия, 3, 6 — камеры с реагентом и реакционная, 4 — трубка, 5 — конус со спиральной канавкой, 7 — напорный трубопровод, 8 — ВЧ-индуктор, 9 — клапан, 10 — вентиль, 11 — мембрана, 12 — масло, 13 — поршень, 14 — подпитывающая емкость

потоком газа-носителя. Недостатком таких дозаторов является трудность поддержания с высокой точностью постоянной разности давления в обеих камерах.

Капельный дозатор (рис. 69, б), предназначенный для мерной подачи треххлористого бора, имеет клапан 9, который периодически открывается. При этом капля реагента из камеры 3 падает в нагретый индуктором 8 сосуд, испаряется и пары поступают в реакционную камеру 6. Для равномерной подачи ПГС необходимо, чтобы частота поступления капель реагента была больше скорости его испарения.

Поршневой дозатор (рис. 69, в) разделен фторопластовой мембраной 11 на две камеры: левую 12, заполненную маслом и работающую по принципу шприца, и правую, являющуюся собственно дозатором. При опускании поршня 13 вниз мембрана 11 изгибается и выталкивает из камеры 3 в зону испарения определенное количество реагента, где его пары подхватываются газом-носителем и поступают в реакционную камеру 6. По мере надобности открывают вентиль 10 и подпитывают из емкости 14 правую камеру дозатора реагентом.

Такой дозатор при наличии сменных цилиндров и поршней и регулируемой частоте вращения привода позволяет получать широкий диапазон концентраций ПГС. Недостатками поршневых дозаторов является значительная утечка реагента. Кроме того, они не обеспечивают точного дозирования при малых расходах реагента.

Достоинствами дозаторов объемного типа являются возможность получения из компонентов с различными свойствами ПГС сложных составов и постоянной концентрации как в начале, так и в конце работы. Кроме того, они менее критичны к изменению параметров окружающей среды и могут использоваться в АСУТП.

Контрольные вопросы

1. Что такое эпитаксия?
2. Какими преимуществами обладают эпитаксиальные приборы по сравнению с диффузионными?
3. Какими методами наращивают эпитаксиальные слои?
4. Какие параметры эпитаксиальных слоев и какими методами контролируют?
5. Какие установки применяют для наращивания эпитаксиальных слоев?
6. Каково устройство реакционных камер, нагревателей и дозаторов установок эпитаксиального наращивания?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ. ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

§ 29. Общие сведения

В соответствии с теорией строения материи все вещества состоят из атомов и молекул. В зависимости от сил сцепления между атомами или молекулами вещество может находиться в твердом, жидком или газообразном состоянии. Эти силы в газах очень малы и их молекулы свободно перемещаются в предоставленном объеме, занимая его целиком. Движение молекул имеет хаотический характер и его называют тепловым. Сред-

няя кинетическая энергия молекул газа пропорциональна его абсолютной температуре. Молекулы массой m в количестве n (на единицу объема), ударяясь с так называемой среднеквадратичной скоростью v о стенки сосуда, в который заключен газ, создают давление $p = nmv^2/3$.

Находясь в непрерывном хаотическом движении, молекулы газа сталкиваются как между собой, так и со стенками сосуда. Количество таких столкновений, или соударений, зависит от числа молекул в единице объема, и чем оно больше, тем чаще происходят соударения.

Среднее расстояние λ , которое молекула проходит между двумя соударениями, называют средней длиной свободного пути. Соотношение между средней длиной свободного пути молекул и линейным размером d сосуда, в который заключен газ, определяет степень разреженности, или вакуума, в сосуде.

Если средняя длина свободного пути значительно меньше размеров сосуда ($\lambda \leq d$), т.е. если молекулы чаще сталкиваются между собой, чем со стенками сосуда, считают, что газ находится под давлением, близким к нормальному (низкий вакуум).

Состояние газа, при котором $\lambda \approx d$, называют средней степенью разреженности или средним вакуумом.

Наконец, состояние для которого соблюдается условие $\lambda \geq d$, т.е. молекулы значительно реже сталкиваются между собой, чем со стенками сосуда, соответствует условиям высокого вакуума.

Явно выраженной границы между низким, средним, высоким и сверхвысоким вакуумом (давлением) нет. Условно эти области вакуума показаны на рис. 70. Давление ниже атмосферного (т.е. степень разрежения) можно измерить в миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). В Международной системе единиц (СИ) единицей давления является паскаль (Па): $1 \text{ мм рт. ст.} \approx 1,33 \cdot 10^2 \text{ Па}$.

Устройства для создания вакуума, приборы для его измерения, а также рабочие объемы (камеры, сосуды, объекты), запорная и регулирующая арматура и трубопроводы образуют вакуумную систему (рис. 71).

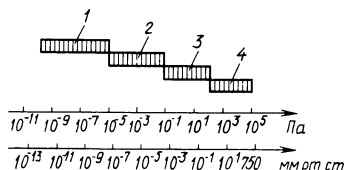
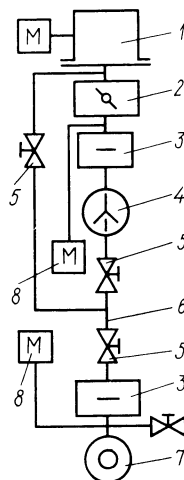


Рис. 70. Области вакуума:
1 — сверхвысокий, 2 — высокий,
3 — средний, 4 — низкий

Рис. 71. Схема вакуумной системы:

1 — рабочий объем, 2 — затвор, 3 — ловушка, 4, 7 — пароструйный и механический насосы, 5 — вентиль, 6 — трубопровод, 8 — манометры (вакуумметры)



Для создания разрежения в вакуумной системе используются два последовательно включенных насоса: пароструйный (высоковакуумный) 4 и механический (форвакуумный) 7. Повушки 3, устанавливаемые перед насосами, предохраняют рабочий объем 1 от попадания паров рабочего вещества насосов и улавливают газы, присутствие которых нежелательно. Повушка перед механическим насосом, кроме того, предохраняет пароструйный насос от попадания рабочего вещества механического насоса.

Вакуумные вентили 5 и затвор 2 служат для соединения и разобщения элементов вакуумной системы и регулирования в ней газового потока. Трубопровод 6 с вентилем, соединяющий рабочий объем с механическим насосом, называют байпасной линией. Байпасная линия служит для предварительного создания низкого вакуума в рабочем объеме таким образом, чтобы исключить попадание газового потока в пароструйный насос. Манометры (вакуумметры) 8 предназначены для измерения вакуума, создаваемого как только механическим, так и одновременно механическим и пароструйным насосами.

§ 30. Средства создания вакуума

Рассмотрим вакуумные механические вращательные насосы (пластинчато-роторный, пластинчато-статорный, плунжерный и турбомолекулярный), пароструйные (паромасляные диффузионные) и сорбционные (геттерные, геттерно-ионные и криогенные), а также вакуумные агрегаты на их основе.

Механические насосы. Основными характеристиками насосов являются предельное остаточное давление и быстрота действия. Принцип действия механических насосов основан на сжатии поступающего из откачиваемого объема газа и последующем его удалении в атмосферу.

Пластинчато-роторный насос (рис. 72, а) состоит из корпуса 2 откачного механизма с цилиндрической рабочей камерой, впускным 1 и выпускным 6 каналами, ротора 3 с двумя пластинами 4 и пружиной 5 между ними, наружного корпуса 8, служащего основанием насоса и масляным резервуаром, и маслоотбойников 7. Так как ось ротора смещена относительно оси цилиндра рабочей камеры, то при вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, подпружиненные пластины 4 постоянно соприкасаются и скользят по поверхности рабочей камеры.

Работает насос следующим образом. При горизонтальном положении пластин 4 в рабочей камере образуется три полости: I — всасывания, II — перемещения и частичного сжатия газа, III — вытеснения газа. При движении ротора полость I увеличивается и дополнительное количество газа из откачиваемого объема через впускной канал 1 поступает в рабочую камеру. Полость II уменьшается в объеме, и газ в ней сжимается. Полость III становится еще меньше, и газ из нее через выпускной канал 6 и обратный клапан (на рисунке не показан) вытесняется из насоса в атмосферу. После этого полость II начинает выполнять функции полости III и наступает момент, когда происходит вытеснение очередной порции газа.

Механические насосы за один оборот ротора совершают два цикла откачки, т.е. из откачиваемого объема отделяются и вытесняются две пор-

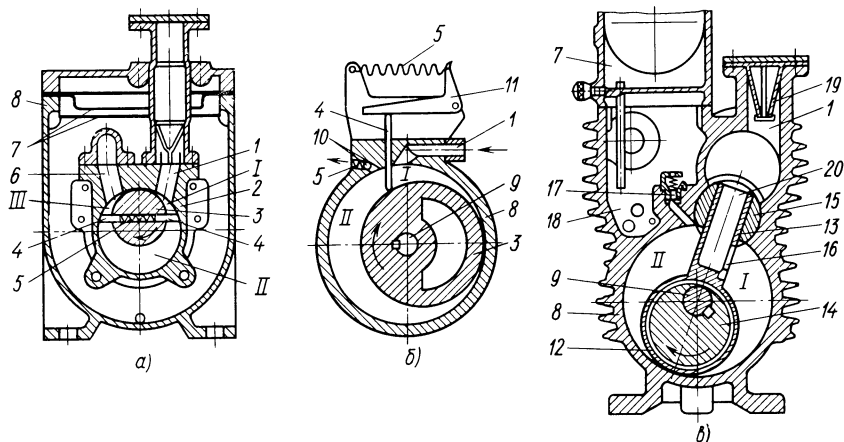


Рис. 72. Механические насосы с масляным уплотнением:

а — пластинчато-роторный, *б* — пластинчато-статорный, *в* — плунжерный; 1, 6 — впускной и выпускной каналы, 2, 8 — корпуса откачного механизма и насоса, 3 — ротор, 4 — пластины, 5 — пружина, 7 — маслоотбойники, 9 — вал, 10 — шарик, 11 — рычаг, 12 — обойма, 13 — плунжер, 14 — эксцентрик, 15 — шарнир, 16 — окно, 17 — выпускной клапан, 18 — масляный резервуар, 19 — защитная сетка, 20 — поршень

ции газа. Насосы этого типа имеют масляную ванну для смазывания, уплотнения и охлаждения вращающихся деталей.

Плазмохимическое и ионно-плазменное оборудование оснащается специально разработанными пластинчато-роторными насосами НВР-16ДХ, имеющими повышенную стойкость к воздействию агрессивных сред. В конструкции этих насосов использованы химически стойкие материалы для пластин и подшипников скольжения, имеются фильтры тонкой очистки масла и устройства для его обезгаживания, картер продувается инертным газом, а также предусмотрен автоматический напуск воздуха (инертного газа) при остановке для защиты деталей от воздействия агрессивной откачиваемой среды.

Пластинчато-статорный насос (рис. 72, *б*) имеет неподвижный корпус 8 — статор, в котором на валу 9 эксцентрично вращается постоянно соприкасающийся с ним ротор 3. Подпружиненная пластина 4 плотно прижимается своим нижним концом к ротору. Выпускной клапан состоит из седла, шарика 10 и пружины 5. Объем рабочей камеры разделен на две полости: I — всасывания, образованную одной стороной пластины 4, а также частью цилиндрических поверхностей статора и ротора, и II — сжатия, образованную другой стороной пластины 4 и остальной частью цилиндрических поверхностей статора и ротора.

При вращении ротора в направлении, указанном стрелкой, газ из откачиваемого объема через впускной канал 1 заполняет увеличивающийся объем полости I. В это же время в полости II газ сжимается. Когда давление газа на выпускной клапан превышает атмосферное, он открывается и газ из полости II вытесняется.

Насосы этого типа за один оборот ротора совершают один цикл откач-

ки, т.е. из откачиваемого объема отделяется и вытесняется только одна порция газа. Пластинчато-статорные насосы, как правило, имеют малую производительность.

П л у н ж е р н ы й (золотниковый) н а с о с (рис. 72, в) имеет поршень 20, состоящий из плунжера 13 и обоймы 12. При вращении вала 9 и эксцентрика 14 обойма движется по внутренней цилиндрической части корпуса 8, а плунжер 13 — по шарниру (золотнику) 15. При опускании плунжера вниз происходит засасывание газа, который через окно 16 попадает в камеру всасывания 1. При движении обоймы в камере 11 газ сжимается, а затем (когда давление его будет выше атмосферного) выбрасывается из насоса через выпускной (выхлопной) клапан 17, в результате чего система откачивается.

В связи с тем что количество трущихся деталей в рабочей камере плунжерных насосов сведено до минимума, они не требуют масляной ванны (как пластинчато-роторные) для охлаждения корпуса. Для смазывания трущихся деталей и уплотнения камер сжатия и всасывания в рабочее пространство подается небольшое количество масла из масляного резервуара 18. Плунжерные насосы за один оборот вала осуществляют один цикл откачки. Выпускаются плунжерные насосы средней и большой производительности.

Т у р б о м о л е к у л я р н ы е насосы обеспечивают безмасляную откачку, быстро запускаются, нечувствительны к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного), имеют широкий диапазон рабочих давлений ($10^{-7} - 10^{-1}$ Па) и примерно одинаковую быстроту действия для большинства газов, а также высокую степень (10^{15}) сжатия газов большой молекулярной массы.

Турбомолекулярный насос (рис. 73, а) представляет собой набор неподвижных статорных 2 и подвижных роторных 6 дисков, закрепленных в корпусе 1 на валу 4, который вращается в опорных подшипниках встроенным электродвигателем с частотой более 10 000 об/мин. Опорные подшипники вала насоса и электродвигателя смазываются под давлением. Насос соединяется патрубком 8 с откачиваемым объемом, а патрубком 7 — с форвакуумным насосом, имеющим масляное уплотнение. Статорные и роторные диски, имеющие наклонные (под углом $15-40^\circ$ к плоскости) радиально расположенные косые пазы, направленные друг к другу, образуют рабочий механизм насоса (рис. 73, б).

Турбомолекулярный насос работает при создании форвакуума в выпускном патрубке не более 10^2 Па. При этом в первый период быстрота действия его мала, потребляемая мощность велика и он сильно нагревается. Принцип действия турбомолекулярного насоса основан на сообщении направленной кинетической энергии молекулам откачиваемого газа быстро вращающимися поверхностями ротора.

При работе насоса возможен частичный пролет молекул в обратном направлении. Отношение вероятностей пролета молекул любого газа в прямом и обратном направлениях характеризуется степенью сжатия данного газа насосом. Легкие газы легче проникают через насос. Для них быстрота действия насоса больше, а степень сжатия меньше. Степень сжатия возрастает с увеличением частоты вращения ротора; увеличение угла наклона

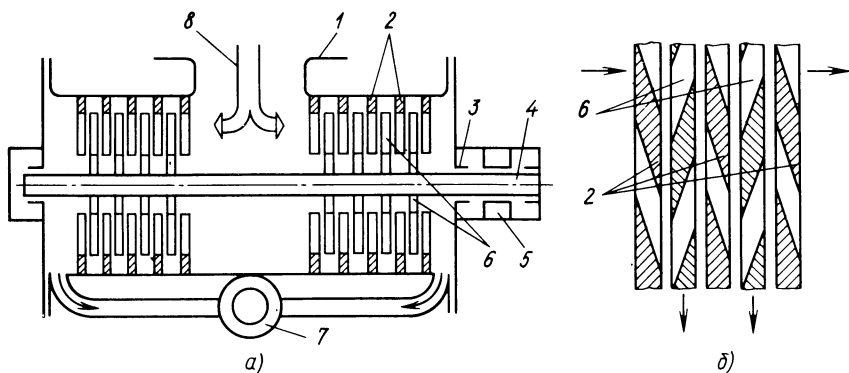


Рис. 73. Турбомолекулярный насос:

а — устройство, *б* — рабочий механизм; 1 — корпус, 2, 6 — неподвижные статорные и подвижные роторные диски, 3 — подшипники, 4 — вал, 5 — электродвигатель, 7, 8 — патрубки для соединения с форвакуумным насосом и откачиваемым объемом

пазов в дисках снижает степень сжатия, но увеличивает быстроту действия насоса.

Основными характеристиками турбомолекулярных насосов являются быстрота действия, предельное остаточное и наибольшее выпускное давление. Графики быстроты действия турбомолекулярных насосов трех типов в зависимости от впускного давления показаны на рис. 74. Как видно из рисунка, в широком диапазоне давлений (от 10^{-1} до 10^{-6} Па) быстрота действия этих насосов постоянна. При давлении меньше 10^{-6} Па она снижается, так как со стороны форвакуума в откачиваемый сосуд перетекают легкие газы и парциальное давление имеет относительно большое значение. Остаточным давлением легких газов и паров воды в откачиваемом объеме в основном определяется предельное остаточное давление, которое у небольших и крупных насосов этого типа соответственно составляет 10^{-7} и 10^{-9} Па.

Вакуумные системы с турбомолекулярными насосами относят к безмасляным, так как их запуск производится от давления 10^1 Па. Предварительная (байпасная) откачка механическим насосом необходима лишь до этого давления. Установка натекателя между затвором и всасывающим патрубком турбомолекулярного насоса упрощает эксплуатацию системы, так как подачей дозированного потока воздуха давлением 10^1 Па на входе форвакуумного насоса подавляется обратный поток паров масла. После запуска турбомолекулярный насос сам становится надежной преградой проникновению паров масла в откачиваемый объем и необходимость в подавлении обратного потока углеводородов отпадает.

Турбомолекулярные насосы ТМН-100, ТМН-200 и ТМН-5000 имеют горизонтальное расположение ротора. В последнее время разработаны также насосы с вертикальным расположением ротора. В частности, насос ТМН-400МП с магнитной подвеской ротора в осевом и радиальном направлениях имеет быстроту действия 400 л/с и отличается повышенной надежностью и малой массой.

Турбомолекулярные насосы обладают стабильной быстротой откачки всех газов в интервале давлений $10^{-1} - 10^{-6}$ Па, но при давлениях больше 1 Па практически не откачивают водород и резко снижается откачка аргона. Кроме того, они дороги.

Пароструйные насосы. Для создания высокого вакуума ($10^{-1} - 10^{-5}$ Па) механических насосов с масляным уплотнением недостаточно. В паре с ними должны работать другие, обеспечивающие получение необходимого давления. Обычно такими насосами являются пароструйные, которые могут быть эжекторными, бустерными или диффузионными. Преимущественно применяют диффузионные парортутные и паромасляные насосы. Парортутные насосы используют ограниченно, так как ртуть токсична. Поэтому широкое распространение получили паромасляные насосы, называемые просто диффузионными.

Д и ф ф у з и о н н ы е п а р о м а с л я н ы е н а с о с ы (рис. 75) основаны на откачивающем действии струи пара рабочей жидкости, выходящей с большой скоростью из рабочего сопла. Пар рабочей жидкости из испарителя поступает в паропровод 1 и далее — в расширяющееся сопло 2, из которого выходит с большой скоростью в виде струи, захватывая молекулы откачиваемого газа, поступающие из впускного патрубка 3 через кольцевое пространство между корпусом насоса и соплом 2. Попав в струю пара, молекулы откачиваемого газа движутся в сторону выпускного патрубка 5. При этом движении смесь пара рабочей жидкости с молекулами откачиваемого газа попадает на охлаждаемую стенку 4 корпуса насоса, где пар конденсируется и стекает в испаритель, чтобы вновь включиться в рабочий цикл насоса, а молекулы откачиваемого газа продолжают движение в сторону выпускного патрубка 5, откуда откачиваются механическим вращательным насосом.

Промышленные диффузионные паромасляные насосы по устройству значительно сложнее. Так, трехступенчатый диффузионный паромасляный насос Н-2Т, применяемый в некоторых напылительных установках, состоит

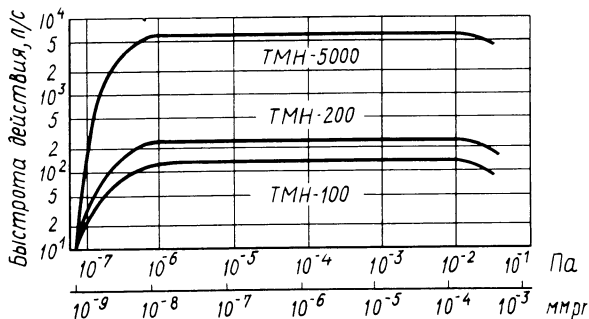


Рис. 74. Графики скорости действия турбомолекулярных насосов в зависимости от впускного давления

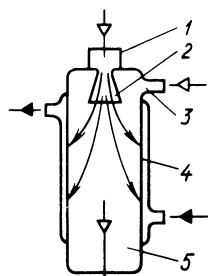


Рис. 75. Схема диффузионного пароструйного насоса:
1 — паропровод, 2 — сопло, 3, 5 — впускной и выпускной патрубки, 4 — охлаждаемая стенка

из корпуса, паропровода, электронагревателя, маслоотражателя и гидрореле.

Корпус насоса, представляющий собой стальной цилиндр с приваренным к нему днищем, имеет впускной и выпускной патрубки с фланцами. С наружной стороны цилиндра и выпускного патрубка приварены последовательно соединенные между собой водяные рубашки, в которые через штуцер подается вода. Все присоединительные фланцы имеют крепежные отверстия и канавки для уплотнительных прокладок. Нижняя часть корпуса насоса служит кипятильником, нагреваемым электронагревателем.

Паропровод, состоящий из основания, к которому сверху стержнем и гайкой крепятся раструб и зонт, а снизу — эжектор выпускного патрубка, имеет три сопла: верхнее, нижнее и эжекторное и соответствующие им паропроводящие каналы. При работе насоса пары масла из кипятильника по паропроводящим каналам попадают в соответствующие сопла и, выходя из них вместе с молекулами откачиваемого газа, конденсируются на охлаждаемых стенках насоса. При этом конденсат стекает вниз по стенкам корпуса обратно в кипятильник к центру дна, а откачиваемый газ направляется к выходному патрубку.

Электронагреватель представляет собой закрытую металлическим кожухом электрическую плитку с нихромовой спиралью, концы которой выведены на зажимы.

Маслоотражатель, предохраняющий откачиваемый объем от паров масла из насоса, охлаждается холодной водопроводной водой.

Гидрореле служит для автоматического отключения электронагревателя при прекращении подачи воды или недостаточном ее поступлении в охлаждающую систему.

Паромасляный насос Н-2Т имеет рабочий диапазон давлений $4 \cdot 10^{-4}$ — $2,6 \cdot 10^{-2}$ Па и быстроту действия по воздуху 1500 л/с.

В ионно-химических и плазмохимических установках применяют паромасляные диффузионные насосы НВД-400 и НВД-1400 с трубчатыми электрическими нагревателями, быстрота действия которых соответственно 400 и 1400 л/с, а предельное остаточное давление 10^{-5} Па. Эти насосы имеют малый обратный поток паров жидкости. В системах, чувствительных к загрязнению парами углеводородов, применяют насосы НВД-120.

На смену паромасляным диффузионным насосам, имеющим цилиндрический корпус, приходят насосы с бочкообразной формой корпуса (рис. 76, а) или с расширенной горловиной (рис. 76, б). В конструкцию насосов также внесены некоторые изменения: внутренняя плита 5 кипятильника сделана гребенчатой, изменена форма паропровода 7, установлена внутренняя ловушка 6 и др. В результате скорость откачки насоса с бочкообразным корпусом увеличилась на 30%, а расширение в насосе горловины на конус с углом 22° увеличило его быстродействие почти в два раза (до 1300 л/с). Насосы с расширенной горловиной уменьшают общую высоту вакуумного агрегата и создают удобство для монтажа водоохлаждаемых и азотных ловушек.

Сорбционные вакуумные насосы. Насосами этого типа являются цеолитовые, геттерные, геттерно-ионные и криогенные. Принцип действия их основан на способности твердого тела поглощать газ. Если поглощение

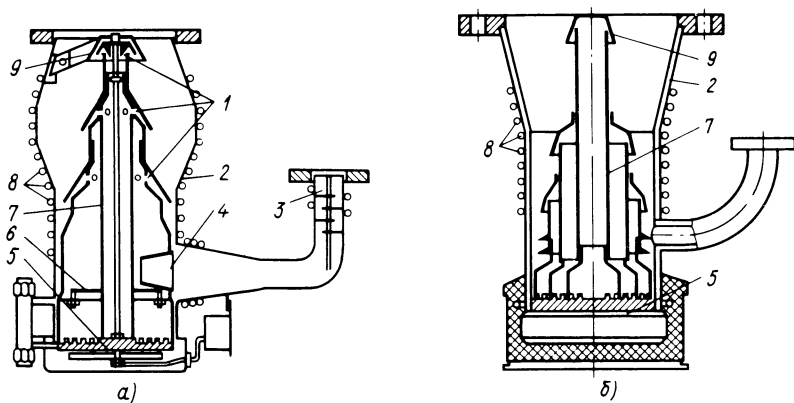


Рис. 76. Модернизированные диффузионные паромасляные насосы:
 а — с бочкообразной формой корпуса, б — с расширенной горловиной; 1 — отверстия, 2 — корпус, 3 — маслоотражатель, 4 — эжекторная ступень, 5 — плита кипятильника, 6 — внутренняя ловушка, 7 — паропровод, 8 — змеевик охлаждения, 9 — колпачковый отражатель

(взаимодействие) газа осуществляется поверхностью твердого тела, такое явление называют адсорбцией, а если всей массой, то его называют абсорбцией. Химическое взаимодействие между газом и твердым телом называют химической адсорбцией или хемосорбцией.

Особый интерес представляют геттерные и геттерно-ионные насосы, которые применяются для создания высокого вакуума (10^{-8} — 10^{-4} Па). Принцип их действия основан на явлении хемосорбции газа возобновляемой пленкой геттера, в качестве которого в насосах промышленного изготовления служит титан. Эти насосы в отличие от пороструйных не требуют форвакуума и предназначены для откачки всех газов, кроме инертных и реагирующих с материалом конструкции. Быстрота их действия при откачке инертных газов составляет всего 1% от быстроты действия по воздуху. Однако геттерные насосы почти всегда, а геттерно-ионные часто работают параллельно со вспомогательными высоковакуумными средствами откачки, которые необходимы для создания условий начала работы этих насосов, а в процессе их работы — для откачки инертных газов. После выхода на режим геттерные и геттерно-ионные насосы ведут откачку без вспомогательных средств.

Геттерный насос СТОИ-20-М (рис. 77, а) имеет корпус 2 в виде цилиндра со стыковочным фланцем 1 с открытой стороны для присоединения к откачиваемому объему и с испарителем 4 с закрытой. Внутри на стенках цилиндра размещен пустотелый экран 6, наполненный жидким азотом, подпитка которого производится из сосуда Дьюара 3. Обращенная к цилиндру поверхность экрана отполирована, а обращенная в рабочий объем является местом конденсации паров титана. Фланец 5 служит для присоединения к насосу вспомогательных средств откачки. Испаритель 4 является источником паров титана, который в виде проволоки автоматиче-

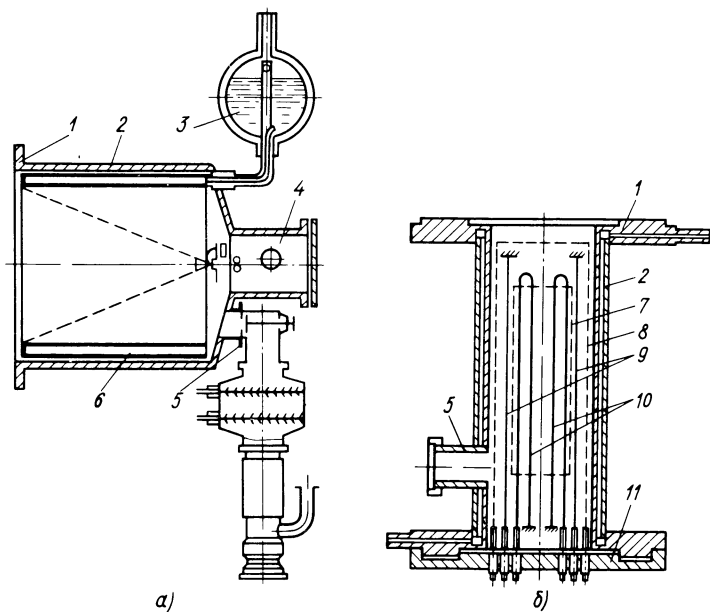


Рис. 77. Геттерный (а) и геттерно-ионный (б) насосы:

1 — стыковочный фланец, 2 — корпус, 3 — сосуд Дьюара, 4 — испаритель, 5 — фланец присоединения вспомогательных средств откачки, 6 — пустотелый экран, 7, 8 — непрогреваемый и прогреваемый аноды, 9 — катоды, 10 — прямоканальные испарители, 11 — нижний фланец

ски подается в зону действия пучка электронной пушки, расплавляется и испаряется.

Предельное остаточное давление, создаваемое насосами СТОН-20-М, меньше $2,5 \cdot 10^{-8}$ Па, а быстрота действия по воздуху 4800 л/с при давлении 10^{-4} Па.

Геттерно-ионный насос ГИН-5 (рис. 77, б) имеет охлаждаемый водой корпус 2, внутри которого расположены прямоканальные титано-молибденовые испарители 10 и смонтированные на нижнем фланце центральный непрогреваемый 7 и прогреваемый 8 аноды, а также катоды 9. Стыковочный 1 и боковой 5 фланцы служат соответственно для присоединения к откачиваемому объему и подключения вспомогательных средств откачки. При работе насоса нагретый титановый испаритель, непрерывно испаряясь, связывает газ откачиваемого объема хемосорбцией. Парообразный титан, конденсируясь на охлаждаемом корпусе насоса, образует пленку геттера. Молекулы газа, ударяясь о поверхность пленки геттера, сорбируются ею. Поток электронов, образующийся между раскаленным катодом 9 и анодом 8, ионизирует газ. Ионы газа ускоряются в промежутке между анодом 8 и корпусом и внедряются в пленку геттера, усиливая эффект сорбции.

Предельное остаточное давление, создаваемое насосами ГИН-5, около 10^{-7} Па, быстрота действия по воздуху 4500 л/с в диапазоне давлений от 10^{-6} до 10^{-4} Па, а по аргону 80 л/с.

Криогенные (криосорбционные) вакуумные насосы являются безмасляными средствами создания вакуума. Принцип действия их основан на явлении связывания (сорбции) газов при их конденсации на большой поверхности, охлажденной до очень низкой температуры. Криогенные насосы предназначены для ионно-плазменных и плазмохимических установок, используются в вакуумном напылительном эпитаксиальном оборудовании и выполняются в виде заливных и охлаждаемых автономных криогенераторов. Криогенные насосы 010ВК-2000-011 и 010С-5000-003 имеют соответственно быстроту действия 2000 и 5000 л/с.

Криогенный насос 010ВК-2000-011 состоит из двухступенчатого криогенератора для получения низких температур и устройства откачки газов, в которое входят теплозащитный экран, жалюзи шевронного типа, конденсационная и сорбционная криопанели. Первая панель криогенератора, имеющая температуру 80–100 К, соединена с теплозащитным экраном и жалюзи, что позволяет снижать теплоприток и удалять легко конденсирующиеся газы. Вторая ступень криогенератора, имеющая температуру 20 К, соединена с конденсационной и сорбционной криопанелями, адсорбирующими соответственно основные составляющие воздуха и неконденсирующиеся гелий, водород, неон.

При давлениях 1–1,5 Па и более можно использовать криогенные насосы с газовой холодильной машиной. Криопанель площадью 50 см² при давлении 15 и 1,5 Па создает соответственно быстроту откачки аргона 150 и 200 л/с.

Достоинством криогенных насосов является большая быстрота действия (десятки тысяч литров в секунду), которая за несколько десятков секунд позволяет создать давление в откачиваемом объеме от 10^{-6} до 10^{-7} Па. Кроме того, они не требуют предварительного прогрева для обезгаживания и при эксплуатации не вносят загрязнений в рабочий объем установок.

Вакуумные агрегаты. Вакуумные напылительные установки, а также плазмохимическое и ионно-плазменное оборудование оснащаются вакуумными агрегатами, выполненными на основе паромасляного диффузионного и механического пластинчато-статорного или другого насоса. Такие агрегаты, кроме того, имеют вакуумный затвор, маслоотражатель, азотную ловушку и другие вспомогательные элементы. Если в вакуумном агрегате в качестве механического используется турбомолекулярный насос с высокой степенью откачки, он может не иметь диффузионного насоса, а компоноваться с форвакуумным. Так, агрегат ТВА-200 состоит из турбомолекулярного насоса ТМН-200 и форвакуумного ВА-2МГ.

Контрольные вопросы

1. Что называют вакуумом, какими средствами его создают и в каких единицах измеряют?
2. Какие элементы входят в вакуумную систему?
3. Каков принцип действия механических насосов?
4. Каков принцип действия пароструйных насосов?
5. Каков принцип действия сорбционных насосов?
6. Какие средства откачки входят в вакуумный агрегат?

§ 31. Общие сведения

Условно пленки металлизации, применяемые для изготовления токопроводящих дорожек, контактных площадок и пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей), разделяют на тонкие (толщиной до 1 мкм) и толстые (толщиной более 1 мкм).

Тонкие пленки преимущественно используют в полупроводниковых приборах (невыпрямляющие контакты, электроды затворов МОП-структур транзисторов, контактные площадки), в монокристаллических и тонкопленочных микросхемах (токопроводящие дорожки, межсоединения, пассивные компоненты). Толстые пленки находят применение в корпусах полупроводниковых приборов и микросхем (токопроводящие дорожки, контактные площадки), а также в толстопленочных и гибридных микросхемах (токопроводящие дорожки, межсоединения, контактные и монтажные площадки, пассивные компоненты).

Несмотря на примерно одинаковое назначение тонких и толстых пленок, получают их различными методами. Тонкие пленки осаждают в вакуумных установках, а толстые наносят методом трафаретной печати на керамические подложки с последующей термической обработкой. По зарубежным данным, выпуск толстопленочных гибридных микросхем в США составляет 75–80% общего объема производства. В нашей стране преимущественное применение нашли тонкие пленки.

Для тонкопленочной металлизации полупроводниковых приборов и микросхем широкое применение получили пленки алюминия, вольфрама и молибдена.

А л ю м и н и й как металл для тонкопленочной металлизации обладает рядом достоинств, основными из которых являются высокая электропроводность, хорошая адгезия к кремнию и его оксидам, большая химическая стойкость в окислительной среде и при воздействии радиации, низкое сопротивление контакта с кремнием и небольшая стоимость. Кроме того, алюминий пластичен и устойчив к циклическим изменениям температуры.

Алюминий испаряют в вакуумных установках электронно-лучевым нагревом. При этом может неконтролируемо изменяться степень совершенства его кристаллической структуры, так как она зависит от многих факторов. Установлено, что ориентированный рост пленок алюминия на чистой поверхности кремния в плоскости (111) можно получить при скорости осаждения $3 \cdot 10^{-2}$ мкм/с и температуре подложки 200–250°С. Для уменьшения сопротивления контакта и повышения адгезии алюминий вжигают при 500–550°С. Иногда алюминий осаждают на подслои титана, платины или палладия, что предотвращает миграцию кремния в пленку металлизации и значительно увеличивает время наработки микросхем.

Основными недостатками алюминиевой металлизации являются несогласованность ее коэффициента температурного расширения с КТР кремния (КТР алюминия в шесть раз больше), невысокая механическая

прочность и образование электрокоррозии при взаимодействии с другими металлами.

Вольфрам лишен некоторых недостатков алюминия. Он хорошо согласуется с кремнием по КТР, имеет высокую механическую прочность и сравнительно хорошую электропроводность (в 2,5 раза меньшую, чем алюминий). Однако вольфрамовые пленки трудно получать и травить, а присоединить электродные выводы можно только к нанесенным на их поверхность никелевым, медным, золотым, платиновым, алюминиевым или другим пленкам. Вольфрамовые пленки используют при многоуровневой металлизации, чередуя их со слоями диоксида кремния. Высокая термостойкость допускает многократную термообработку вольфрамовых пленок без ухудшения их свойств.

Тонкопленочные слои (токопроводящие дорожки, электроды затворов МОП-транзисторов, резисторы, контактные площадки, невыпрямляющие контакты и др.) получают напылением через маски или селективным травлением нанесенного слоя под защитой фоторезиста.

Маски могут быть монометаллическими, биметаллическими и триметаллическими. Отверстия в них для создания рисунков заданной конфигурации (элементов) получают просто резанием металлообрабатывающим инструментом и с ультразвуковым воздействием, штамповкой, электроэрозионной (электроискровой) обработкой, химическим или электрохимическим травлением, гальванопластикой. Перед напылением маски накладывают на подложки, плотно прижимают к ним и фиксируют специальными маскодержателями.

Монометаллические маски, наиболее простые в изготовлении, но не обеспечивающие нанесения пленочных элементов с высокой точностью, выполняют из фольги из меди, латуни, пермаллоя, нержавеющей стали, тантала, молибдена, вольфрама и других материалов любым из указанных способов. В биметаллических масках, имеющих большую точность, вторым слоем служит никель, гальванически нанесенный на фольгу из меди, латуни или бронзы. Фотолитографией и химическим травлением в пленке никеля получают рисунки, расположенные на жесткой основе металлической фольги.

При изготовлении триметаллических масок никель наносят с двух сторон фольги из нержавеющей стали, а затем фотолитографией и гальванопластикой осаждают слой меди требуемых рисунков. Точность триметаллических масок довольно высока, но они не обладают достаточной жесткостью, прочностью, упругостью и, кроме того, этим способом трудно изготовить (а точнее снять) маску со сложными рисунками.

Биметаллические и триметаллические маски в настоящее время применяются в тонкопленочной технологии ограниченно, так как не обеспечивают требуемой точности и сложны в изготовлении, хотя некоторые из них можно многократно использовать при напылении.

Кроме того, маски, служащие один раз, можно выращивать непосредственно на подложках. Для этого на подложку наносят фоторезист, фотолитографией получают в нем отверстия требуемой конфигурации и осаждают в них какой-либо металл (например, хром). Затем подложку обрабатывают в растворителе для фоторезиста. Растворяясь, фоторезист отрывает

лежащую на нем металлическую пленку, которая остается только на тех местах, где она была осаждена на подложку. Открытые места в металлической пленке являются маской, через которую напыляют тонкопленочные элементы.

Растворение фоторезиста под металлической пленкой носит название **взрывной** или **обратной фотолитографии**. Такие маски позволяют получать рисунки тонкопленочных элементов с более высокой точностью, чем маски, изготавливаемые отдельно от подложек.

Селективное травление напыленного слоя под защитой фоторезиста в настоящее время получило преимущественное применение как метод, хорошо освоенный в микроэлектронике и отвечающий современным требованиям к качеству получаемых тонкопленочных элементов. Сущность этого метода состоит в том, что на подложки сплошным слоем напыляют требуемый металл, на который наносят слой фоторезиста, экспонируют его через фотошаблон, проявляют, травят металлическую пленку в жидком травителе, удаляют остатки фоторезиста, получая в результате

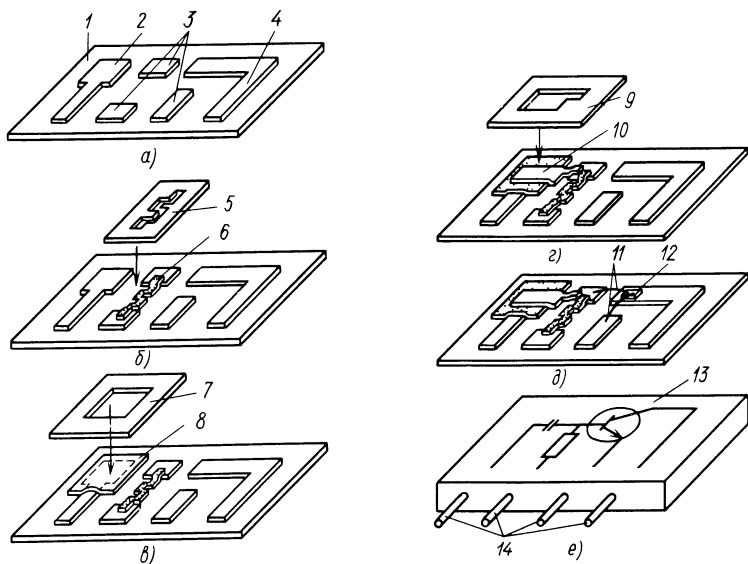


Рис. 78. Стадии изготовления тонкопленочной гибридной микросхемы: **а** — получение тонкопленочных элементов металлизацией травлением, **б** — получение танталового резистора напылением в вакууме через маску, **в** — получение изолирующей обкладки конденсатора из диоксида кремния распылением в вакууме, **г** — получение верхнего электрода конденсатора испарением металла в вакууме, **д** — монтаж транзистора с присоединением электродных выводов к токоведущим дорожкам, **е** — готовая гибридная микросхема, загерметизированная в пластмассу; 1 — подложка, 2 — нижний электрод конденсатора, 3 — контактные площадки, 4 — токоведущая дорожка, 5, 7, 9 — маски для изготовления резистора, изолирующей обкладки и верхнего электрода конденсатора, 6 — резистор, 8, 10 — изолирующая обкладка и верхний электрод конденсатора, 11 — электродные выводы транзистора, 12 — транзистор, 13 — пластмасса, 14 — внешние выводы микросхемы

нужный рисунок. Другими словами, можно сказать, что для изготовления тонкопленочных элементов заданной конфигурации используют фотолитографию. Селективное травление применяют для воспроизведения с высокой точностью сложных рисунков многослойных тонкопленочных структур.

Подложки из германия, кремния, арсенида галлия и других полупроводников, а также из ситалла, фотоситалла, корундовой и бромеллитовой керамики, полиимида, простого и кварцевого стекла, используемые для изготовления полупроводниковых приборов и интегральных и гибридных микросхем, должны быть обработаны с минимальной шероховатостью, обладать высокими электрической и механической прочностью, теплостойкостью и теплопроводностью, химической инертностью и иметь КТР, согласованный с КТР напыляемого металла. Материалов, отвечающих всем этим требованиям, не существует, поэтому используют такие, которые в наибольшей степени им соответствуют. Поверхность подложек, кроме того, должна быть очищена от загрязнений.

Тонкие металлические пленки наносят, как правило, в вакууме испарением и конденсацией, ионным и магнетронным распылением. Последовательность выполнения операций при изготовлении тонкопленочной гибридной микросхемы показана на рис. 78, а–е.

§ 32. Нанесение тонких пленок методом испарения и конденсации в вакууме

Метод нанесения тонких пленок испарением и конденсацией в вакууме хорош тем, что сравнительно прост, обеспечивает высокую производительность при групповой обработке подложек и большую скорость осаждения металла без загрязнения как через маски, так и без них. Однако он не лишен недостатков, к которым можно отнести невысокую воспроизводимость свойств пленок, особенно при напылении сплавов, трудность испарения тугоплавких металлов, а также высокую инерционность нагревателей, малый срок их службы и сложность контроля за скоростью осаждения и толщиной пленок. Несмотря на эти недостатки, метод испарения и конденсации в вакууме получил наиболее широкое применение.

Основными характеристиками тонких пленок являются удельное сопротивление и толщина, которые можно контролировать в процессе нанесения, так как они взаимно связаны. Имеется третья характеристика — равномерность толщины, которая не поддается контролю, но очень важна, так как существует тенденция к увеличению диаметра подложек. Равномерность толщины наносимой пленки прежде всего зависит от конструкции вакуумной напылительной установки. Для нанесения равномерных по толщине металлических и диэлектрических пленок необходимо, чтобы испаритель был равноудален от всех подложек, т.е. были созданы одинаковые условия для всех подложек.

Одним из наиболее рациональных оказалось решение создать внутрикамерное устройство (рис. 79, а, б), в котором расположенные в барабане 2 подложки вращаются планетарно, т.е. по собственной круговой траектории и одновременно по круговой траектории относительно непод-

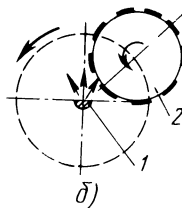
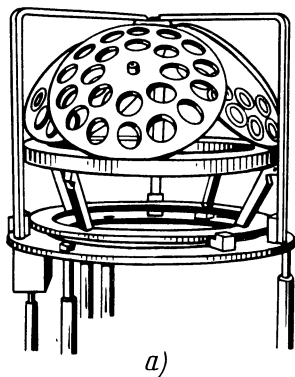


Рис. 79. Внутрикамерное устройство:

а — общий вид, *б* — схема планетарного вращения подложек; 1 — испаритель, 2 — барабан с подложками

вижно расположенного в центре испарителя 1. При такой конструкции внутрикамерного устройства улучшается равномерность распределения осаждаемого вещества по толщине и более чем в два раза увеличивается площадь одновременно обрабатываемых подложек.

Качество осаждаемых пленок существенно зависит от конструкции и типа испарителя, которые, в свою очередь, определяются состоянием испаряемого вещества. По конструкции испарители бывают проволочные, ленточные и тигельные. Материал испарителя должен быть полностью инертным по отношению к испаряемому веществу, но хорошо им смачиваться и иметь очень низкое давление паров при рабочей температуре. Этим условиям наиболее отвечают вольфрам и молибден.

Проволочные испарители изготовляют в виде обычной или конической спирали, зигзага и навешивают на них испаряемый материал (кусочки проволоки или ленты). Ленточные испарители представляют собой узкие полоски вольфрама или молибдена с углублениями, в которых размещают испаряемый материал, в том числе и в виде порошка. Оба вида испарителей просты и дают широкий поток испаряемого материала, охватывая значительную площадь внутрикамерного устройства.

Тигельные испарители изготовляют из молибдена, вольфрама, бромелитовой и корундовой керамики, а также из графита и других материалов. Достоинством их является возможность испарения большого количества вещества, а недостатком — инерционность нагрева и охлаждения, а также узкий поток испаряемого вещества.

Испарители бывают резистивные и электронно-лучевые. Резистивные испарители (ленточные, проволочные и тигельные) уже были рассмотрены. Ознакомимся с электронно-лучевыми, которые имеют высокую плотность мощности (до $5 \cdot 10^8$ Вт/см²), а следовательно, высокую температуру и тем самым позволяют испарять самые тугоплавкие материалы. В то же время электронно-лучевые испарители требуют высокого напряжения (10 кВ) и, кроме того, при их работе возможно возникновение бомбардировки вторичными электронами (выбиваемыми из испаряемого вещества) подложек, технологической оснастки, поверхностей внутрикамерного устройства, что вызывает интенсивное газовыделение.

Следует помнить, что качество наносимых пленок зависит от наличия в

камере остаточных газов, которые, адсорбируясь на подложках, изменяют (в ту и другую сторону) теплоту адсорбции, внося неопределенность в процесс конденсации, уменьшая коэффициент прилипания осаждаемого материала и количество зародышей. Это может привести к образованию пленок с неравномерной структурой. Начавшийся рост пленки сопровождается поглощением остаточных газов. Для уменьшения загрязнения осаждаемого вещества необходимо, чтобы: давление во внутрикамерном объеме было не более $2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-5}$ Па, а скорость осаждения по возможности большей.

§ 33. Нанесение тонких пленок методом ионного распыления

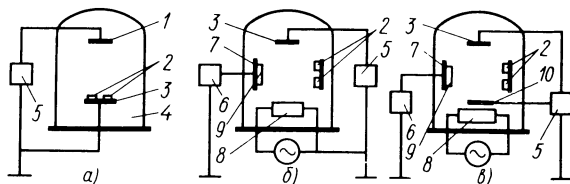
Метод ионного (плазмоионного, или ионно-плазменного, с автономными ионными источниками) распыления по сравнению с методом испарения и конденсации позволяет на подложках большой площади получать пленки всех (тугоплавких, многокомпонентных сплавов, полупроводников, полупроводниковых соединений и диэлектрических) материалов, используемых в полупроводниковой электронике, с хорошей адгезией, сохранением стехиометрического (количественного) состава и равномерной толщины. Принцип ионного распыления состоит в бомбардировке мишени ионами инертного газа, в результате чего частицы осаждаемого материала конденсируются на поверхности подложек.

Для получения тонких пленок этим методом применяют несколько типов установок, например плазмоионные и с автономными ионными источниками (без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень). Плазмоионные установки могут быть диодного, триодного и тетродного типов и работают в диапазоне давлений от 10^1 до $5 \cdot 10^{-2}$ Па, а также высокочастотные. Каждая распылительная система обладает определенными достоинствами и недостатками.

Установка ионного распыления диодного типа (рис. 80, а) является наиболее простой по устройству и состоит из анода 3 и катода 1, смонтированных в рабочей камере 4. Каждый электрод выполняет две функции: катод является источником электронов, поддерживающих горение тлеющего разряда, и одновременно — мишенью, распыляемой под ударами положительных ионов; анод также поддерживает горение тлеющего разряда

Рис. 80. Установки ионного распыления на постоянном токе диодного (а), триодного (б) и тетродного (в) типов:

1 — катод, 2 — подложки, 3 — анод, 4 — рабочая камера, 5, 6 — источники питания и подачи обратного напряжения, 7, 10 — дополнительные электроды, 8 — термокатод, 9 — мишень



и одновременно служит держателем подложек, на которые осаждается пленка распыляемого материала катода.

Кроме простоты достоинствами этой установки можно считать ее высокую надежность, возможность использования для реактивного распыления, низкую стоимость и равномерность толщины наносимых пленок. Недостатками установки являются сравнительно малая скорость распыления (20—30 нм/мин), обусловленная значительным давлением инертного газа в рабочей камере, трудность очистки подложек в начале процесса и вероятность нарушения структуры пленки при ее бомбардировке заряженными частицами. Однако такие установки применяют довольно широко, в том числе и в линиях непрерывного действия для изготовления тонкопленочных резисторов.

Установка ионного распыления триодного типа (рис. 80, б) отличается от рассмотренной тем, что имеет термоэлектродный катод (третий электрод), а тетродного типа, кроме того, еще и дополнительный (четвертый) электрод. Наличие в распылительной системе термокатода, являющегося источником электронов, способствует ионизации аргона при сравнительно низком (10^{-1} Па) давлении. Распыляемый материал (мишень) в триодной системе располагается на электроде 7, а подложки 2 — на карусели или барабане напротив.

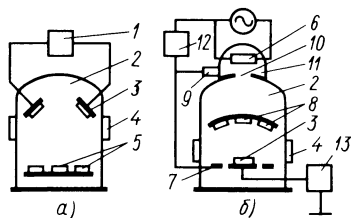
На таких установках можно очищать поверхности мишени и подложки подачей на них небольшого отрицательного напряжения. При подаче отрицательного напряжения в несколько сот вольт начинается интенсивная бомбардировка мишени положительными ионами, в результате чего выбитые из нее атомы движутся в перпендикулярном направлении к подложкам и осаждаются на них. Скорость осаждения в триодной системе может регулироваться в широком диапазоне (от 0,1 до 100 нм/мин) при изменении режимов распыления (напряжения накала термокатода, потенциала мишени и давления инертного газа).

В установках с тетродной системой четвертый электрод (рис. 80, в), расположенный над термокатодом 8, служит для создания условий, обеспечивающих ионизацию инертного газа при давлении $(2 \div 4) \cdot 10^{-2}$ Па, т.е. меньшем, чем в установках с триодной системой. Триодная и тетродная системы распыления могут использоваться для осаждения пленок многокомпонентного состава, так как позволяют одновременно или последовательно распылять с различной скоростью несколько мишеней из различных металлов и сплавов.

Установки высокочастотного (ВЧ) распыления (рис. 81, а), используемые преимущественно для нанесения диэлектрических пленок, отличаются простотой, обеспечивают высокую равномерность пленок по толщине и возможность осаждения диэлектрических пленок в инертной среде, а металлических и полупроводниковых — методом реактивного распыления. В рабочей камере 2 расположены две мишени 3, получающие питание от ВЧ-источника 1 мощности, и подложки 5 на держателе. Снаружи рабочей камеры размещен электромагнит 4.

В такой рабочей камере при питании от генератора с двухтактным незаземленным выходом разряд локализуется в непосредственной близости от электродов, на которых закреплены мишени. Напряжение ВЧ

Рис. 81. Установки высокочастотного (а) и с автономным источником ионного тока (б) распыления: 1 — источник ВЧ-мощности, 2, 11 — рабочая и ионизационная камеры, 3 — мишень, 4 — электромагнит, 5, 8 — подложки, 6 — термоэлектронный катод, 7, 9 — основной и вспомогательный аноды, 10 — диафрагма, 12, 13 — источники питания анода и подогрева мишени



служит для нейтрализации положительного заряда, который накапливается на мишени (диэлектрике) при ее бомбардировке положительными ионами плазмы, что способствует интенсивному распылению диэлектрика. Скорость распыления колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен нм/мин и зависит от материала мишени, частоты ВЧ-мощности, подаваемой на электроды мишени, напряженности внешнего магнитного поля.

Ионную обработку подразделяют на реактивное и высокочастотное распыление, а также плазменное анодирование.

Реактивным распылением наносят пленки тугоплавких металлов (тантала, титана, циркония, ниобия), а также германия, кремния, алюминия, никеля, серебра, золота и др. При этом положительные ионы газа разрушают служащую катодом мишень из напыляемого материала.

Процесс реактивного распыления проводят при давлении газа $10^1 - 1$ Па. Для ионизации газа между анодом и катодом прикладывают достаточно высокое напряжение (несколько киловольт). В результате в рабочей камере возникает так называемый тлеющий разряд. Ионы остаточного газа бомбардируют катод, частицы которого распыляются и переносятся на предварительно нагретые подложки. Качество пленки зависит от расстояния между катодом и анодом, межэлектродного напряжения и давления газа под колпаком.

Реактивное распыление выполняют на установках с диодными системами, работающими на постоянном токе или напряжении ВЧ (либо при их сочетании) и создающими плазму из смеси аргона с кислородом.

Плазменное анодирование по существу представляет собой реактивное катодное распыление в кислородной среде. Распыляя тантал бомбардировкой ионами кислорода, получают пленки оксида тантала. Так же можно наносить пленки оксидов других металлов.

Установка распыления с автономным источником ионного тока (рис. 81, б) имеет рабочую 2 и ионизационную 11 камеры, соединенные между собой небольшим отверстием в диафрагме 10. В рабочей камере находятся держатель с подложками 8 и основной кольцевой анод 7, в центре которого расположена мишень 3; снаружи камеры размещен электромагнит 4. В ионизационной камере смонтированы термокатод 6 и вспомогательный анод 9.

При напуске инертного газа в ионизационную камеру его давление повышается примерно в 20 раз. Между термокатодом 6 и вспомогательным анодом 9 образуется термоэлектронная эмиссия, результатом которой является ионизация инертного газа в камере. Образовавшаяся плазма вытягивается через отверстие диафрагмы 10 основным анодом 7 в рабочую камеру, концентрируясь полем, создаваемым электромагнитом 4. При

бомбардировке мишени 3 положительными ионами частицы распыляемого материала осаждаются на подложках 8, расположенных в верхней части объема рабочей камеры. Держатель подложек охлаждается проточной водой и защищает их обратную сторону от осаждения распыляемого материала специальным металлическим экраном, находящимся под потенциалом анода.

§ 34. Нанесение тонких пленок методом магнетронного распыления

Магнетронное распыление по сравнению с другими методами нанесения тонких пленок обладает рядом достоинств, основными из которых являются: высокая скорость распыления; незначительная степень загрязнения получаемых пленок посторонними газовыми включениями; низкая температура нагрева подложек; хорошая адгезия осажденных пленок к материалу подложек; возможность распыления как проводников, так и диэлектриков; получение сверхтонких (менее 20 нм) пленок с малыми радиационными дефектами; безынерционность процесса.

Магнетронное распыление применяют при изготовлении жидких кристаллов (сверхтонких прозрачных пленок), прецизионных фотошаблонов (тонких пленок хрома) и микросхем (нанесения пленок из алюминия, его сплавов и тугоплавких металлов).

Магнетронная распылительная установка (рис. 82) состоит из магнитной системы 1, на которой расположены плоская мишень-катод 2, а над ней по периметру — анод 3. Монтируется эта система под колпаком вакуумной распылительной установки, рабочим газом в которой после откачки служит аргон. При подаче питания от источника постоянного тока над мишенью-катодом создается неоднородное электрическое поле и аномальный тлеющий разряд, под действием которого происходит образование плазмы и ионная бомбардировка мишени-катода.

Замкнутое магнитное поле магнетронной распылительной системы локализует плазму непосредственно у поверхности распыляемой мишени. Под действием ионной бомбардировки эмитированные катодом-мишенью электроны захватываются и удерживаются магнитным полем, совершая сложное циклическое движение у поверхности мишени до тех пор, пока не произойдет их столкновение с атомами аргона. В результате столкновения электроны теряют большую часть энергии на ионизацию рабочего газа (прежде чем они попадут на анод), что увеличивает концентрацию положительных ионов у поверхности мишени-катода, усиливает ее ионную бомбардировку, скорость распыления материала и осаждения пленки.

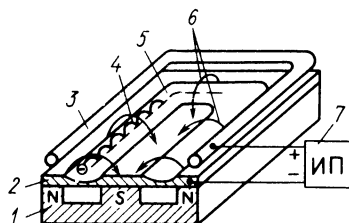


Рис. 82. Магнетронная распылительная установка с плоской мишенью:

1 — магнитная система, 2 — катод-мишень, 3 — анод, 4 — траектория движения электронов, 5 — зона распыления, 6 — силовые линии магнитного поля, 7 — источник питания

Таким образом, для магнетронных распылительных установок характерно пересечение электрического и магнитного полей, наличие магнитной ловушки у распыляемой поверхности мишени (увеличивающей скорость распыления) и отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетическими вторичными электронами, которые захватываются магнитной ловушкой, что обеспечивает незначительный нагрев подложки. Средняя скорость осаждения, например, молибдена и золота соответственно составляет 12 и 37 нм/с на установке с плоской дисковой мишенью диаметром 150 мм при мощности источника питания 4 кВт и расположении подложки на расстоянии 60 мм от него. При этом температура нагрева подложки соизмерима с температурой ее нагрева при термическом испарении в вакууме легкоплавких металлов, значительно ниже, чем при испарении тугоплавких, и соответственно составляет 79 и 163°С для алюминия и молибдена. Это позволяет использовать магнетронные установки для нанесения пленок на такие материалы, как бумага, оргстекло, пластики и другие, обладающие низкой термостойкостью.

Стабильность и воспроизводимость наносимых на подложки пленок зависят от оптимальных параметров, основными из которых являются: напряжение питания электродов; ток разряда; плотность тока мишени; удельная мощность; индукция магнитного поля; рабочее давление. Напряжение питания, подаваемое на электроды, обычно не превышает 1000 В. На мишень, как правило, подают отрицательный потенциал, а на анод — нулевой или положительный в зависимости от конструкции системы. Ток разряда, зависящий от мощности источника питания, а также других параметров, подбирают экспериментально. Плотность тока на мишени колеблется от 40 до 200 мА/см² и в центральной части зоны распыления может превышать эти значения. Удельная мощность лежит в интервале от 40 до 100 Вт/см² и определяется условиями охлаждения и теплопроводностью распыляемого материала.

Важнейшим параметром магнетронных распылительных установок является вольт-амперная характеристика разряда, зависящая от рабочего давления и индукции магнитного поля. С уменьшением давления в системе и индукции магнитного поля вольт-амперные характеристики разряда сдвигаются в область больших рабочих напряжений. Скорость осаждения пленки почти линейно зависит от приложенной мощности и увеличивается с ее возрастанием. Мощность разряда при постоянной мощности источника питания также зависит от рабочего давления и индукции магнитного поля. Так, с ростом индукции магнитного поля до 0,08–0,1 Тл при низком рабочем давлении (оно обычно лежит в диапазоне от 10⁻² до 1 Па и выше) мощность разряда достигает максимума. При высоком рабочем давлении максимум мощности получают при индукции магнитного поля 0,04–0,06 Тл.

В процессе осаждения пленок обычно управляют каким-либо одним параметром, оставляя остальные на оптимальном уровне. Например, регулируют толщину пленок, изменяя время осаждения.

В установках магнетронного распыления применяют различные системы. Коаксиальная и планетарная распылительные системы показаны на рис. 83, а, б.

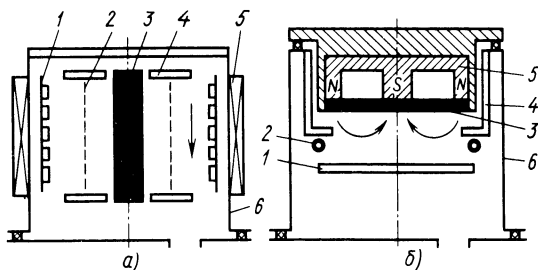


Рис. 83. Коаксиальная (а) и планетарная (б) магнетронные распылительные системы:
1 — подложкодержатель, 2 — анод, 3 — катод-мишень, 4 — экран, 5 — магнитная система, 6 — колпак

В коаксиальной магнетронной системе (рис. 83, а) катод-мишень 3 представляет собой цилиндрический стержень из распыляемого материала, вокруг которого расположены подложкодержатели 1 с подложками. Между подложкодержателями и катодом-мишенью находятся аноды 2 с экранами 5. Магнитная система 5 смонтирована снаружи колпака 6. Достоинствами установки с коаксиальной магнетронной распылительной системой являются высокая производительность (одновременно можно обрабатывать большое количество подложек), небольшая интенсивность бомбардировки подложек вторичными электронами (аксиальное магнитное поле, заземленные экраны по торцам цилиндрического катода и сетчатый цилиндрический анод). Максимальная температура подложек не превышает 320 К. Недостатком ее можно считать незначительную скорость осаждения распыляемого материала на подложках, так как часть его остается на сетчатом аноде.

Планетарная магнетронная распылительная система (рис. 83, б) является более совершенной, так как имеет большую скорость осаждения материала на подложки (примерно такую же, как при вакуумном термическом напылении) вследствие увеличения плотности тока. Недостатком ее является большой расход распыляемого материала, так как используется только узкая кольцеобразная область мишени, составляющая всего 26% ее площади.

Кроме того, используют другие магнетронные распылительные системы, например с цилиндрическим полым, коническим или полусферическим вогнутым катодом, каждая из которых обладает определенными достоинствами и недостатками.

Для нанесения тонких пленок применяют установки магнетронного распыления с неподвижными (01 НИ-7-006) и с подвижными (УВНМ-Э-10-001) магнитами, в которых использование распыляемого материала составляет соответственно 40 и 75%. Обе установки управляются микропроцессорами, контролирующими ход осаждения материала и корректирующими его при отклонении от заданного режима. Основная информация о работе установок отражается на дисплее.

Заслуживает также внимания установка магнетронного распыления полунепрерывного действия 01НИ-7-014, предназначенная для нанесения тонких алюминиевых пленок на кремниевые пластины диаметром 76 и 132

100 мм. Планетарный подложкодержатель установки вращается относительно двух осей, что создает одинаковые условия для нанесения пленок на все пластины и обеспечивает получение воспроизводимых результатов. Цикл обработки подложек состоит из четырех стадий: шлюзования; плазмохимической очистки; нагрева; магнетронного нанесения пленок. Управляет работой установки микропроцессор. Результаты обработки отражаются на дисплее.

§ 35. Измерение толщины пленок

Контролируют толщину пленок вольт-емкостным, резистивным и оптическим методами, а также взвешиванием. Некоторые из этих методов позволяют измерять толщину пленки при конденсации металла. Несмотря на то что толщина пленок зависит от многих факторов (вида распыляемого материала, его количества, взаимного расположения испарителя и подложек, способа напыления, рабочего вакуума и др.), необходимость в измерениях после каждого напыления обычно отпадает, если условия работы стабильны. Наибольшее применение нашли резистивный метод и метод взвешивания: первый — в процессе нанесения, а второй — после получения пленки.

Резистивный метод основан на зависимости между толщиной пленки h и ее сопротивлением постоянному току: $h = \rho a / (Rb)$ (где a и b — соответственно длина и ширина пленки; R — сопротивление пленки на единицу площади поверхности; ρ — удельное сопротивление напыляемого металла).

В связи с тем что удельные сопротивления пленочных и компактных (массивных) образцов из одного и того же вещества могут быть различны, используют поправочные коэффициенты. При измерениях рядом с полупроводниковыми подложками помещают контрольный образец — квадратную пластинку из диэлектрического материала, снабженную с двух сторон плоскими серебряными контактами, которую соединяют с измерительным блоком.

Методом взвешивания определяют массу напыленного материала и рассчитывают толщину пленки $h = (P_2 - P_1) / (F\gamma)$ (где P_1 и P_2 — соответственно масса подложки без пленки и с пленкой; F — площадь пленки; γ — плотность материала). Правильность измерений зависит не только от точности взвешивания, но и от верной оценки плотности материала пленки. Рассчитанное значение является усредненным.

Кроме того, толщину металлических пленок, например предназначенных для невыпрямляющих контактов, можно определить по микроинтерферометру Линника (рис. 84). Для этого на полупроводниковой пластине 1 с напыленным слоем 3 пинцетом или иглой делают риску 2, которая по глубине доходила бы до подложки. Затем пластину помещают на предметный столик микроинтерферометра (риской вниз) и, вращая его, добиваются совмещения одной из нитей перекрестия прибора с направлением интерференционных полос, а другой — с направлением риски. В месте перехода риски от полупроводника к слою металла полосы изгибаются.

Для определения толщины нанесенного слоя необходимо измерить

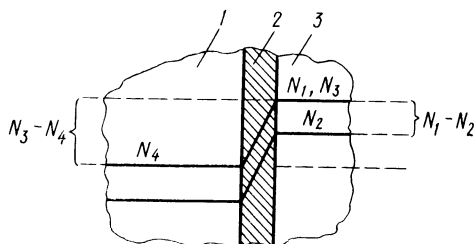


Рис. 84. Измерение интервала и изгиба интерференционной полосы при определении толщины металлической пленки:

1 — полупроводниковая пластина, 2 — риска, 3 — напыленная металлическая пленка

интервал между соседними интерференционными полосами и степень изгиба (смещения) полос. Эти операции выполняют с помощью окулярного микрометра, определяя вначале положение одной интерференционной полосы, а затем — соседней. Разность отсчетов дает искомое значение. Так же оценивают изгиб полосы. Для расчета берут среднее из трех измерений.

При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности, равной 0,27 мкм. Толщину напыленного слоя (мкм) рассчитывают по формуле $h = 0,27 (N_3 - N_4) / (N_1 - N_2)$ (где N_1 и N_2 — первый и второй отсчеты при измерении интервала; N_3 и N_4 — первый и второй отсчеты при оценке изгиба полосы).

При измерении этим методом толщины нанесенного слоя обычно пользуются таблицами, которые разрабатывают на основе набора статистических данных.

§ 36. Многослойная металлизация

Возросшие требования к стабильности параметров и надежности изделий микроэлектроники, а также необходимость повышения степени интеграции (плотности размещения элементов) привели к разработке новых технологических процессов — многослойной и многоуровневой металлизации в виде металлических пленок алюминия, тугоплавких металлов, а также их сочетаний.

В производстве изделий микроэлектроники для металлизации широко применяют алюминий. Однако его пленки имеют ряд недостатков (см. § 32). Поэтому в последнее время ведутся работы по поиску металлов, пленки которых не имели бы недостатков.

Наиболее подходящими для изготовления затворов полевых транзисторов и невыпрямляющих контактов СВЧ-приборов и микросхем оказались пленки тугоплавких металлов (вольфрама и молибдена) толщиной 0,1–0,2 мкм. Эти пленки, кроме того, используются в качестве источника диффузии, предварительно легировав их бором, сурьмой или другим диффузантом, для маскировки пленок диоксида кремния при травлении, а также вместо пленок хрома при изготовлении фотошаблонов. Пленки вольфрама и молибдена обладают большей разрешающей и меньшей отражательной способностью, менее пористы и хрупки и не имеют значительных напряжений.

Применительно к кремнию предпочтение отдают вольфраму, который обладает высокой твердостью, инертностью на воздухе и при обработке в

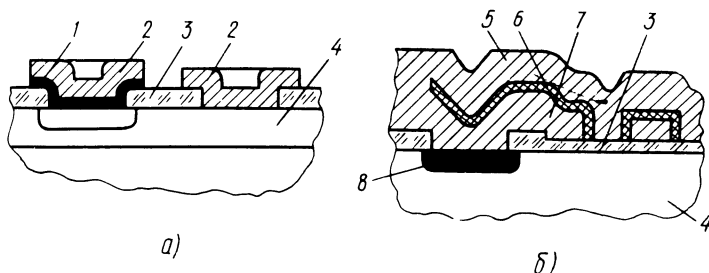


Рис. 85. Виды металлизации:

а — двухслойная, *б* — двухуровневая; 1 — молибден, 2 — алюминий с кремнием, 3 — диоксид кремния, 4 — кристалл кремния, 5, 7 — второй и первый уровни металлизации, 6 — оксид алюминия, 8 — платина

растворе плавиковой кислоты, хорошей электропроводностью, имеет КТР, близкий к КТР кремния, и высокую температуру плавления эвтектики с кремнием.

Невыпрямляющие контакты в полупроводниковых СВЧ-приборах должны обеспечивать надежное соединение, низкое объемное сопротивление, высокую адгезию к полупроводнику и пленке диоксида кремния, минимальное проникновение металла в зону электронно-дырочного перехода и возможность простого присоединения электродных выводов. Этим требованиям отвечает двух- и трехслойная металлизация, каждый слой которой выполняет определенную функцию.

Примерами двухслойной металлизации могут служить сочетания пленок вольфрама и золота, молибдена и золота, молибдена и алюминия (рис. 85, *а*), в которых нижний слой обладает высокой адгезией к кремнию или его диоксиду и малыми растворимостью и коэффициентом диффузии, а верхний имеет хорошую электропроводность и обеспечивает возможность присоединения электродных выводов термокомпрессией. Для нанесения пленок вольфрама и молибдена обычно применяют вакуумное напыление, испаряя металл энергией электронного пучка.

Чтобы устранить образование интерметаллических соединений (взаимодействие металлических слоев), в двухслойную металлизацию вводят третий слой. Так, в трехслойной металлизации титан — вольфрам — золото вольфрам выполняет роль барьера, препятствуя диффузии золота в кремниевый кристалл. Кроме того, применяют трехслойную металлизацию хром — серебро — золото, хром — платина — золото, молибден — алюминий — золото и др.

Располагая элементы микросхем в виде пленочных металлических слоев друг над другом и разделяя их диэлектрическими пленками, получают многоуровневую металлизацию, значительно увеличивающую степень интеграции микросхем. Двухуровневая металлизация показана на рис. 85, *б*. После создания невыпрямляющего платинового контакта 8 на полупроводниковую пластину 4 наносят диэлектрическую пленку 3 диоксида кремния, а на нее — слой 7 алюминия, образующий первый уровень металлизации. Получив в слое 7 алюминия окна, на пластину наносят диэлектрическую пленку 6 оксида алюминия, на которую напыляют слой алюминия 5,

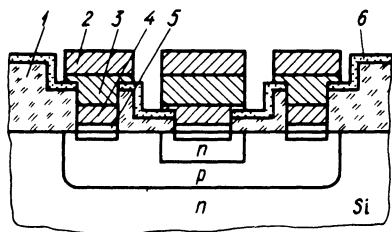


Рис. 86. Структура транзистора с трехслойной металлизацией:

1 — диоксид кремния, 2, 3, 4 — слои золота, платины, титана, 5 — силицид платины, 6 — нитрид кремния

образующий второй уровень металлизации. В каждом слое (уровне) металлизации с помощью фотолитографии и диффузии создают активные и пассивные компоненты микросхем.

Трехслойная металлизация (рис. 86) состоит из силицида платины 5, титана 4 и платины 3. Силицид платины образуется при ее взаимодействии с кремнием. Этот слой имеет малое контактное сопротивление и хорошую адгезию к кремнию. Титан имеет хорошую адгезию к пассивирующему слою диоксида кремния 1. Для создания надежного контакта при соединении электродных выводов термокомпрессией и защиты электродов от коррозии на слой платины наносят слой золота. Платина препятствует проникновению золота в слой титана. Трехслойная металлизация сложна при изготовлении, но создает условия повышенной устойчивости зарядов к электромиграции и обладает высокой адгезией к диоксиду кремния и др.

Следует обратить внимание на то, что для защиты активных областей транзисторов используют два пассивирующих слоя — диоксида и нитрида кремния. Сочетание диэлектриков компенсирует недостатки диоксида кремния (пористость, образование трещин, плохую адгезию к металлам) и повышает надежность приборов. Пленки нитрида кремния наносят реактивным распылением или пиролизом. Качество и скорость их осаждения зависят от способа нанесения.

§ 37. Нанесение толстых пленок

Трафаретная печать (сетко- или шелкография) — наиболее распространенный способ нанесения толстопленочной металлизации на керамические подложки. При продавливании ракелем (ножом) металлизационной пасты на поверхность подложки через открытые участки трафарета (сетки из проволоки) получают точно соответствующий им рисунок металлизации. Качество трафаретной печати зависит в основном от вязкости и поверхностного натяжения пасты, конструкции и качества изготовления трафаретов и ракеля, состояния поверхности подложек. Количество пасты, нанесенной на подложку, определяется диаметром проволоки сетки, размером отверстий, толщиной светочувствительного слоя, шириной линий наносимого рисунка.

Вязкость пасты определяют вискозиметром. Принцип действия его основан на измерении усилия, необходимого для вращения с заданной (постоянной) частотой погруженного в пасту шпинделя. В полупроводниковом производстве применяют более простой способ определения вязкости, для чего каплю пасты (0,15 г) помещают между двумя стеклян-

ными пластинами, которые сдавливают с усилием 2,64 Н в течение 15 мин. Паста, состоящая из 100 г металлизующего порошка, 6 г ланолина, 6 мл циклогексанола и 1,5 мл вазелинового масла, считается пригодной для трафаретной печати, если диаметр растекания ее капли равен 18–19 мм. Кроме того, применительно к конкретным условиям состав паст подбирают, опробуя их.

Поверхностное натяжение пасты определяется силами межмолекулярного взаимодействия. Если помещенная на керамическую поверхность капля пасты сохраняет форму сферы или эллипсоида, такая паста имеет большое поверхностное натяжение, а если принимает форму возвышенности (бугорка), поверхностное натяжение пасты мало и она хорошо смачивает подложку. При этом паста не должна растекаться.

Трафарет (рис. 87) представляет собой металлическую рамку, на которую натянута проволочная сетка 3 из нержавеющей стали или других материалов. Сетки подразделяют по диаметру проволоки, из которой их изготавливают, и количеству отверстий (ячеек).

Рисунок наносят на трафарет фотолитографией, для чего покрывают сетку слоем светочувствительного вещества — фоторезиста, который экспонируют через фотошаблон с необходимым рисунком и проявляют. На незасвеченных участках фоторезист растворяется в проявителе, обнажая сетку, а на засвеченных остается. Рабочим полем трафарета является рисунок, через который продавливают пасту. Сеточные трафареты из нержавеющей стали обеспечивают минимальную ширину линий металлизации 250 мкм и расстояния между их осями 500 мкм. Кроме того, трафареты изготавливают из фольги химическим травлением. Рисунки, получаемые с помощью таких трафаретов, имеют максимальную ширину металлизационных линий менее 250 мкм.

Разрешающую способность трафаретной печати можно повысить, подбирая состав пасты и применяя сетки из очень тонких проволок с небольшими ячейками. При этом получают линии металлизации шириной 75–125 мкм при расстоянии между их осями 200–250 мкм.

Ракель (рис. 88) представляет собой нож из каучука, уретана или полиуретана, предназначенный для продавливания металлизационной пасты через отверстия в трафарете. Ракель должен быть твердым, износостойким и стойким к воздействию содержащихся в пасте растворителей, иметь оп-



Рис. 87. Трафарет:
1 — фоторезист, 2 — открытые ячейки сетки, 3 — сетка

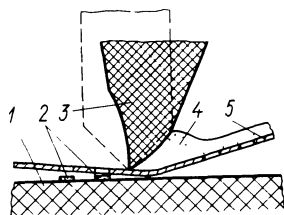


Рис. 88. Ракель:
1 — подложка, 2 — металлизационный рисунок, 3 — ракель, 4 — металлизационная паста, 5 — сеткотрафарет

тимальные форму и угол заточки лезвия, плотно прилегать к сетке трафарета по всей длине его рабочего поля.

Металлизируемые керамические поверхности должны иметь минимальные отклонения номинальных размеров и шероховатость не более 0,5—0,75 мкм, а также незначительные отклонения плоскостности и плоскопараллельности. Оборудование, применяемое при металлизации, должно обеспечивать надежную фиксацию (вакуумом), а также легкие и удобные съем и установку керамических подложек. Расстояние между трафаретом и металлируемой керамической поверхностью должно быть одинаковым по всей площади и регулироваться с точностью ± 25 мкм.

При работе установки трафаретной печати металлируемые керамические подложки укладывают в держатель, накрывают трафаретом и наносят на него пасту, которая при движении ракеля продавливается через открытые участки сетки. При этом трафарет под действием ракеля прогибается до соприкосновения с металлируемой поверхностью. После прекращения движения ракеля трафарет снимают и извлекают подложки из держателя. Оборудование для трафаретной печати может быть ручным и механизированным. Толщина возложенных толстых пленок обычно лежит в интервале 12,5—25 мкм.

Подложки (платы) для толстопленочных гибридных микросхем изготовляют из поликристаллических керамических материалов, основными свойствами которых являются: высокое удельное сопротивление (для надежной изоляции элементов); низкая диэлектрическая постоянная (для снижения паразитных емкостей); хорошая теплопроводность (для отвода теплоты в мощных схемах); значительная химическая активность (для получения прочного сцепления с проводниками); согласование по КТР с элементами схем (для надежной работы схем и улучшения их электрических параметров); достаточная механическая прочность (для сохранения геометрических размеров и целостности при климатических и механических воздействиях); высокая термостойкость (для вжигания толстых пленок при температуре не более 1150°C без значительного изменения размеров и чрезмерного взаимодействия с подложками).

Наиболее полно этим требованиям отвечают бромеллитовая и корундовая керамика, а также керамика на основе титаната бария. Бромеллитовая керамика обладает высокой теплопроводностью и используется для изготовления мощных микросхем. Имеющая широкое применение корундовая керамика дешева и содержит стеклофазу, активно взаимодействующую при спекании с компонентами толстых пленок и создающую прочное их сцепление. Керамика на основе титаната бария характеризуется высокой диэлектрической постоянной и может служить диэлектриком в конденсаторах гибридных микросхем.

Керамические подложки обычно имеют толщину до 1 мм, поэтому целесообразнее их изготовлять из керамической ленты по следующей технологической схеме: вырубка; обжиг; механическая обработка, химическая очистка; нанесение металлизации (создание токопроводящих дорожек, контактных и монтажных площадок, пассивных компонентов) и ее вжигание.

Для создания толстопленочных токопроводящих дорожек, резисторов,

изоляторов и других элементов необходимы пасты, обладающие различными свойствами. Как правило, пасты состоят из трех компонентов: металла, стекла и смеси нескольких органических веществ.

Токопроводящие дорожки, выполняющие функции выводов резисторов и конденсаторов, контактные площадки для дискретных элементов, а также межсоединения должны иметь высокую электрическую проводимость (малое электрическое сопротивление), хорошую адгезию к подложке и длительно сохранять контакт без ухудшения его качества. Обычно в пастах для изготовления токопроводящих дорожек используют сплавы из таких дорогих и дефицитных металлов, как палладий — серебро или палладий — золото, платина — золото.

Для изготовления толстопленочных резисторов пригодны многие металлы и сплавы, например оксид таллия, который в смеси со свинцово-боросиликатным стеклом имеет удельное сопротивление от 50 до 10^7 Ом/квadrat. Температура вжигания этой пасты 550°C , а стоимость значительно ниже стоимости паст, содержащих благородные металлы. Резисторы, изготавливаемые из пасты, в которую входят палладий и серебро, имеют удельное сопротивление от 1 до 10^6 Ом/квadrat. При вжигании такой пасты необходимо строго поддерживать оптимальный температурный режим по профилю печи и постоянство газовой атмосферы.

Изоляция обкладок конденсаторов и пересечений токопроводящих дорожек на подложках должна иметь высокую электрическую прочность и малый тангенс угла диэлектрических потерь. Диэлектрические пасты для изоляции обкладок конденсаторов, которые должны иметь высокую диэлектрическую постоянную, получают на основе титаната бария BaTiO_3 . После вжигания диэлектрическая постоянная изоляции составляет около 1000. Основой диэлектрических паст для изоляции пересечений служат различные стекла, КТР которых должны соответствовать КТР проводников (токопроводящих дорожек) и подложек. Кроме того, эти пасты должны быть совместимы с материалом проводников, т.е. не вступать с ним в реакцию, а также обладать оптимальной вязкостью, обеспечивающей плотность и непрерывность пленки. Стекол с такими свойствами не существует. Поэтому приходится стекло, имеющее вязкость 100 П, закристаллизовывать при определенной температуре. В результате оно приобретает вязкость 1000 П и более. Применяя такое стекло, создают многослойную структуру межсоединений на подложке без сцепления проводников.

Термическую обработку — вжигание толстых пленок — выполняют в муфельных (из кварца, керамики) конвейерных печах (термических установках) с тремя зонами: предварительного нагрева; максимальной температуры; охлаждения. Важно, чтобы в зоне предварительного нагрева произошло полное выгорание органической связки. Скорость предварительного нагрева должна быть оптимальна. При большой скорости нагрева выгорание органической связки сопровождается разрушением пленок, появлением пузырей и отставанием их от подложек. При малой скорости нагрева в связке задерживается углерод, который при максимальной температуре образует пузырьки в стекле, а также восстанавливает оксиды металлических компонентов паст.

Вжигают пленки на воздухе, отводя газообразные продукты реакций

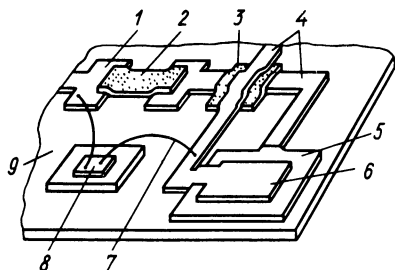


Рис. 89. Толстопленочная гибридная микросхема:

1 — контактные площадки, 2 — резистор, 3 — изоляция, 4 — токопроводящие дорожки, 5, 6 — диэлектрическая прокладка и верхний электрод конденсатора, 7 — электродный вывод, 8 — транзистор, 9 — подложка

вытяжной вентиляцией. Для получения высокого процента выхода годных по электрическим параметрам изделий необходимо в зоне максимальной температуры поддерживать температуру с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

Толстопленочная гибридная микросхема (рис. 89), изготовленная на подложке 9, состоит из транзистора 8, электродных выводов 7, контактных (монтажных) площадок 1, резистора 2, конденсатора (диэлектрическая прокладка 5 и верхний электрод 6), соединенных токопроводящими дорожками 4 через изоляцию 3.

§ 38. Ионно-плазменное травление

Химическая реакционная способность плазмы используется в микроэлектронике для очистки и травления поверхностей деталей из различных материалов, удаления слоя фоторезиста, нанесения металлических, диэлектрических и полупроводниковых пленок разложением металлоорганических соединений, получения тонких пленок реактивным распылением и для других целей.

Очистку и травление, а также удаление слоя фоторезиста обычно выполняют жидкостной химической обработкой, по сравнению с которой плазмохимическая обработка обладает рядом преимуществ. Так, плазмохимическое травление является сухим процессом, менее вредным для здоровья персонала, обеспечивает высокую разрешающую способность и меньшее боковое подтравливание. Кроме того, операции очистки, травления и снятия фоторезиста можно последовательно выполнять в одной камере.

Дальнейшее повышение быстродействия и степени интеграции изделий микроэлектроники требует создания на полупроводниковых пластинах рисунков приборов и микросхем субмикронных размеров (1 мкм и менее). Химическая (жидкостная) обработка для этого непригодна, так как полупроводниковый материал травится во всех направлениях. В последние годы для этой цели применяют ионно-плазменное травление, которое может быть ионным, ионно-химическим и плазмохимическим.

Ионное травление основано на разрушении обрабатываемой поверхности ионами инертных газов, обладающих значительной кинетической энергией, и может быть ионно-плазменным и ионно-лучевым. В первом случае обработка поверхностей производится бомбардировкой ионами, вытягиваемыми из плазмы, а во втором — сфокусированным пучком ионов, вытягиваемых из автономного ионного источника.

Ионно-химическое травление, основанное на разрушении поверхностей подложек ионами, обладающими большой кинетической энергией, и одновременном воздействии химически активных газов (аргона, кислорода, фреона и др.), может быть реактивным ионно-плазменным (поверхность бомбардируют ионами химически активных газов, вытягиваемых из плазмы) и реактивным ионно-лучевым (подложки бомбардируют ионами, вытягиваемыми из автономного источника).

Плазмохимическое травление, основанное на взаимодействии ионов и радикалов активного газа с обрабатываемой поверхностью с образованием летучих соединений, может быть плазменным (подложки обрабатывают плазмой химически активных газов) и газовым (подложки обрабатывают незаряженными химически активными частицами газа, поступающими из плазмы).

Наибольший интерес представляет плазмохимическое травление (ПХТ), так как оно обладает селективностью (избирательностью), равномерностью и скоростью, сравнимыми с жидкостным химическим травлением, но не требует очистки поверхностей после обработки, позволяет одновременно травить подложки и удалять фоторезистивные (электронно-резистивные) маски, а также может использоваться для обработки любых материалов (нитрида кремния, алюминия, хрома, золота, платины, титана, молибдена, вольфрама и др.). Кроме того, процессом плазмохимического травления может управлять ЭВМ.

Контролируют окончание травления поликристаллического кремния, нанесенного на слой диоксида кремния, по снижению температуры. Травление диоксида кремния не сопровождается выделением теплоты. При травлении полупроводниковых пластин в кассетах принимают меры для защиты их обратной стороны. Такая защита может быть выполнена слоем оксида кремния, фоторезиста или в виде пленок из алюминия. При горизонтальном расположении полупроводниковых пластин в рабочей камере защита не требуется. Обработка незащищенных нерабочих сторон пластин вызывает их нагрев и хемосорбцию свободных радикалов, что может привести к замедлению либо прекращению травления диоксида и нитрида кремния или других материалов на рабочей стороне пластин.

При ионно-плазменном травлении используют те же установки, что при вакуумном распылении или специализированные.

В автоматической установке плазмохимического травления с диодной ВЧ-системой (рис. 90) разряд поддерживается между двумя параллельными электродами 1, один из которых является столом для размещения обрабатываемых пластин 9. После обработки пластин разброс по глубине травления составляет $\pm 10\%$ в пределах диаметра стола, равного 250 мм. Откачка системы полностью автоматизирована. Предварительное разрежение, равное $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па, можно получить за 5 мин. Давление в рабочей камере 11 поддерживается автоматически в пределах $1,33 \cdot 10^{-1} - 13,3$ Па. Максимальная ВЧ-мощность составляет 800 Вт и может регулироваться.

В производстве полупроводниковых приборов и микросхем обрабатывают структуры типа кремний — диоксид кремния, кремний — диоксид кремния — кремний ($\text{Si} - \text{SiO}_2$, $\text{Si} - \text{SiO}_2 - \text{Si}$) и др. При химической обработке происходит подтравливание на границе раздела слоев (рис. 91, а).

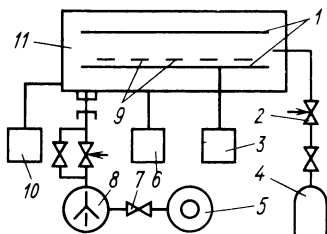


Рис. 90. Структурная схема автоматической установки плазмохимического травления с диодной ВЧ-системой:

1 — электроды, 2 — натекатель, 3 — блок управления ВЧ-источником питания, 4 — источник газа, 5, 8 — механический и диффузионный насосы, 6 — блок управления последовательностью операций, 7 — вентиль, 9 — пластины, 10 — регулятор давления газа, 11 — рабочая камера

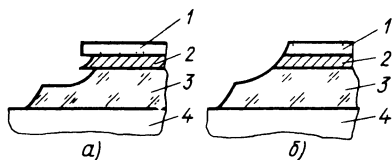


Рис. 91. Профили после химического (а) и плазмохимического (б) травления структур:

1, 4 — поликристаллический и монокристаллический кремний, 2, 3 — нитрид и диоксид кремния

Такой профиль трудно закрыть металлической пленкой без ее разрыва. При плазмохимическом травлении во фреоновой плазме CF_4 получают пологий профиль с углом наклона $60\text{--}70^\circ$, без подтравливания (рис. 91, б). Обрыва металлизации в этом случае не происходит. Угол наклона профиля травления можно изменять, защищая слоем фоторезиста необходимую площадь поверхности.

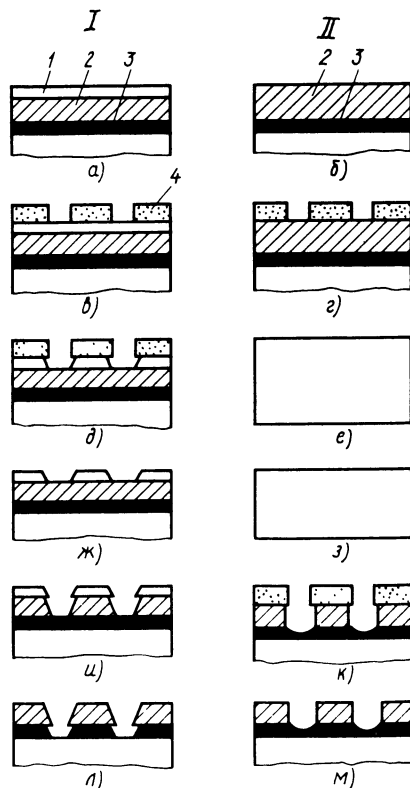
Плазмохимическое травление используют для обработки поликристаллического кремния при производстве МОП-транзисторов с кремниевым затвором. Последовательность выполнения операций при жидкостном химическом I и плазмохимическом II травлении показана на рис. 92, а—м. Как видно из этого рисунка, при плазмохимическом травлении выполняют на две операции меньше.

Для удаления фоторезиста с полупроводниковых пластин применяют кислородную плазму. Химически активными при этом являются возбужденные молекулы кислорода, атомарный кислород и озон. Причем атомарного кислорода в кислородной плазме содержится $10\text{--}20\%$. Под действием химически активного кислорода происходит разложение фоторезиста. Введение 1% азота увеличивает скорость удаления фоторезиста на 20% , а 1% водорода — на 100% по сравнению со скоростью его удаления в чистой кислородной плазме, так как эти добавки ускоряют образование атомарного кислорода.

Кислородная плазма непригодна для удаления неорганических (например, металлических) загрязнений, которые попадают из некоторых фоторезистов на полупроводниковые пластины и внедряются в них после его удаления. Это объясняется тем, что неорганические вещества не образуют летучих продуктов при соединении с кислородом. В этом случае используют плазму газовой смеси, состоящей из кислорода и фтористого углерода CF_4 (фреон-14). Фоторезист и неорганические соединения, взаимодействуя

Рис. 92. Последовательность выполнения операций при жидкостном химическом и плазмохимическом травлении:

а, б — нанесение оксидной пленки затвора, кремниевой поликристаллической пленки и слоя SiO_2 (для ПХТ слой SiO_2 не требуется), *в, г* — нанесение фоторезиста, его экспонирование и проявление, *д* — травление SiO_2 в буферном растворе плавиковой кислоты, *е, з* — при ПХТ операции не выполняются, *ж* — удаление фоторезиста, *и, к* — травление поликристаллического кремния в кислотном травителе и в плазме фреона, *л, м* — удаление слоя SiO_2 и фоторезиста в плазме кислорода; 1 — слой SiO_2 , 2 — поликристаллический кремний, 3 — кремниевая подложка (пластина), 4 — фоторезист



соответственно с кислородом и фтористым углеродом, становятся летучими и легко удаляются. Скорость такой обработки ниже, чем при обработке в кислородной плазме, но высокое качество очистки компенсирует этот недостаток.

Плазменная обработка пригодна для травления кремния Si, его диоксида SiO_2 и нитрида Si_3N_4 , а также таких металлов, как молибден, вольфрам, титан и тантал. При травлении этих материалов используют плазму фтористого углерода, при ионизации которого образуется активный радикал фтора, взаимодействующий с кремнием, его диоксидом, нитридом и тугоплавкими металлами с образованием летучих фторидов.

Скорость травления монокристаллического кремния различна и зависит от его кристаллографической ориентации (для плоскости $\langle 100 \rangle$ она выше, чем для плоскости $\langle 111 \rangle$). Поликристаллический кремний и нитрид кремния травятся с одинаковой скоростью, но быстрее монокристаллического. Диоксид кремния травится медленнее нитрида примерно в 10 раз.

В качестве маски при травлении кремния во фреоновой плазме может служить специальный фоторезист, который наносят толстым слоем. Так как фреоновая плазма не обладает достаточной селективностью (избирательностью) травления, возможно частичное стравливание кремниевой пластины. Лучшие результаты получают, используя в качестве маски пленки нитрида кремния, нанесенные на слой диоксида кремния.

Плазмохимическое травление кремния сопровождается выделением теплоты и, если ее не отводить, может наступить неуправляемое подтравливание. Управляют скоростью травления и выделением теплоты, добавляя азот в смесь активных газов (CF_4 и O_2).

§ 39. Вакуумные установки для нанесения тонких пленок

Вакуумные установки для нанесения тонких пленок разделяют на четыре группы. К первой относят универсальные вакуумные установки, имеющие сравнительно невысокую производительность, но обладающие большими возможностями. Рабочая камера этих установок представляет собой колпак, поднимаемый и опускаемый вертикально. Работают они периодически и в основном предназначены для исследовательских целей. Установки второй группы, более производительные, также периодического действия, имеют подвижную или неподвижную горизонтально расположенную рабочую камеру с групповой загрузкой подложек.

Установки третьей и четвертой групп, высокой производительности, предназначены для оборудования цехов серийных заводов. Установки третьей группы оснащены шлюзовыми камерами и имеют полунепрерывный цикл работы, а установки четвертой группы оборудованы загрузочными и транспортирующими устройствами, шлюзовыми камерами, имеют непрерывный цикл работы и представляют собой производственные линии.

Вакуумные установки выполняются примерно по одной схеме, имеют много общих элементов и отличаются друг от друга конструкцией устройств, повышающих производительность труда, которая зависит от степени непрерывности технологического процесса и количества одновременно обрабатываемых подложек. Поэтому рассмотрим устройство и принцип действия наиболее простых вакуумных установок и их особенности.

Установка вакуумного напыления тонких пленок (рис. 93) состоит из основания, колпака (рабочей камеры) с механизмом для его подъема и подколпачным устройством, вакуумной системы, системы охлаждения и пульта управления с электрическим блоком.

Основанием установки служит сварной стальной каркас 12, закрытый металлическими панелями и панелями пульта управления 13. Колпак 6 с подколпачным устройством расположен на верхней панели (столешнице) и представляет собой герметичную, из нержавеющей стали, открытую снизу конструкцию, которая вакуумно-плотно соединяется с базовой плитой резиновым уплотнением 10. Для наблюдения за процессом напыления в колпаке имеются смотровые окна. Под колпаком на базовой плите размещен поворотный механизм с вращающимися каруселями 7 и 8 подложек и масок, а также испаритель 9.

Механизм подъема колпака обычно представляет собой винтовую пару (или винтовые пары), гайка которой неподвижно закреплена на колпаке, а винт — на каркасе установки. Находясь в гайке, винт при вращении в одну или другую сторону поднимает либо опускает колпак. Привод винта производится электродвигателем через редуктор.

Вакуумная система установки предназначена для создания разрежения под колпаком и состоит из вращательного механического 14 и паромасля-

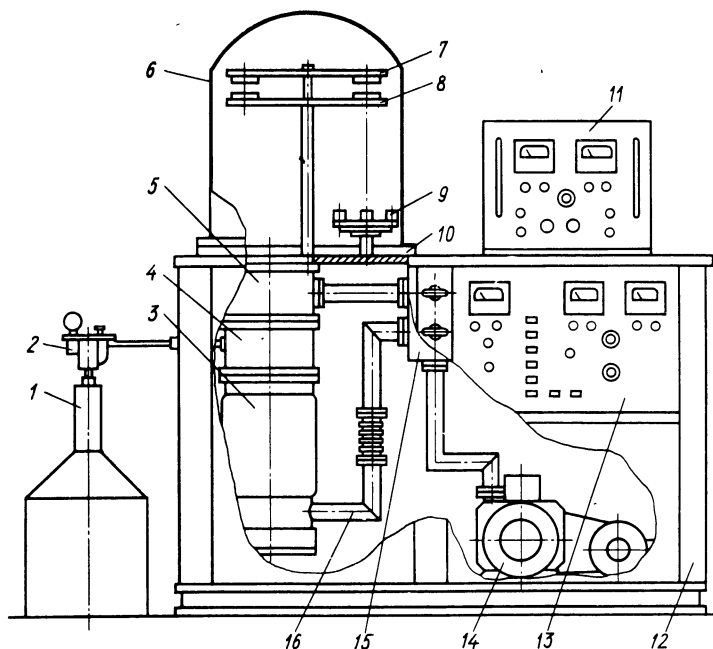


Рис. 93. Установка вакуумного напыления тонких пленок:

1 — сосуд Дьюара, 2 — автоматический питатель жидкого азота, 3 — паромасляный насос, 4 — азотная ловушка, 5 — вакуумный затвор, 6 — колпак (рабочая камера), 7, 8 — карусели подложек и масок, 9 — испаритель, 10 — резиновое уплотнение, 11 — переносные приборы, 12 — сварной стальной каркас, 13 — пульт управления, 14 — вращательный механический насос, 15 — блок клапанов, 16 — трубопроводы

ного 3 насосов, вакуумного затвора 5, блока клапанов 15, трубопроводов 16, а также спиральной азотной ловушки 4, в которую автоматическим питателем 2 подается из сосуда Дьюара 1 жидкий азот.

Все вакуумные системы имеют одинаковый порядок включения на откачку. Вначале включают механический насос, который откачивает систему до давления $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па, а затем — паромасляный, который создает давление до 10^{-3} Па. Для создания более высокого вакуума используют азотную ловушку, пропуская через нее жидкий азот.

В системе охлаждения паромасляного насоса, колпака и испарительного устройства проточной водой предусмотрено гидрореле, отключающее установку при недостаточном давлении воды и сигнализирующее об этом. Для прогрева подколпачного устройства и колпака с целью обезгаживания и устранения конденсации паров воды при его подъеме в установке имеется специальный нагреватель.

На пульте управления сосредоточены контрольные приборы и приборы управления (кнопки, сигнальные лампы, предохранители), которые соединены проводами с низковольтными и высоковольтными источниками питания, предназначенными для нагрева испаряемого вещества, зажигания тлеющего разряда и очистки подложек.

В зависимости от назначения установки вакуумного напыления оснащают электронно-лучевыми испарителями и устройствами программного управления (температурой нагрева испарителя и подложек, скоростью испарения, давлением в рабочей камере, сопротивлением осаждаемых пленок и др.).

В периодически действующих вакуумных напылительных установках наибольшее время расходуется непроизводительно — на откачку рабочего объема до требуемого разрежения. Одним из способов сокращения времени откачки является уменьшение продолжительности соприкосновения подколпачного устройства и внутренних поверхностей колпака (рабочей камеры) с атмосферным воздухом. Если в рабочий объем напустить осушенный воздух и поднять колпак не более чем на 5 мин, время откачки до необходимого давления уменьшится вдвое по сравнению с тем, когда под колпак напускают атмосферный воздух. Другим способом снижения непроизводительных затрат времени является использование вакуумных напылительных установок и линий соответственно полунепрерывного и непрерывного действия. Это создает также одинаковые условия для нанесения пленок высокого качества.

Трехкамерная вакуумная установка нанесения тонких пленок с полунепрерывным циклом работы (рис. 94) имеет рабочую камеру 5, а также входную 3 и выходную 8 камеры — шлюзы, отделенные друг от друга вакуумными затворами 1.

При работе установки кассеты 4 с подложками подаются во входную камеру, закрываются все затворы и производится откачка камер механическими насосами. При определенном давлении затвор между входной и рабочей камерой открывается и кассета с подложками перемещается в рабочую камеру, после чего во входную камеру напускается воздух, а в рабочей создается высокий вакуум, открывается заслонка 7 под постоянно нагретым испарителем 6 и производится напыление пленок. После напыления затвор открывается и кассета перемещается в выходную камеру. Затем затвор закрывается и в выходную камеру напускается воздух.

Далее рабочий цикл продолжается таким образом. Когда кассета с напыленными пластинами перемещается в выходную камеру, другая кассета подается в рабочую. Повышение производительности труда при работе на такой установке происходит вследствие частичного совмещения подготовительных операций, связанных с откачкой и загрузкой — выгрузкой кассет.

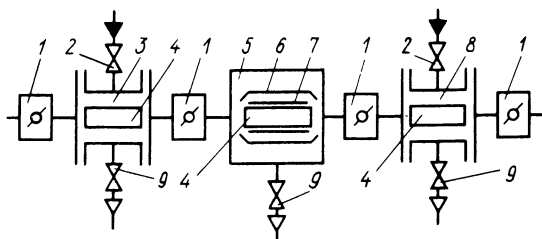


Рис. 94. Схема трехкамерной вакуумной установки нанесения тонких пленок с полунепрерывным циклом работы: 1 — вакуумные затворы, 2 — вентили напуска воздуха, 3, 8 — входная и выходная камеры-шлюзы, 4 — кассета, 5 — рабочая камера, 6 — испаритель, 7 — заслонка, 9 — вентили

Вакуумные установки непрерывного действия komponуются примерно по одной схеме и состоят из входных и выходных (шлюзовых) камер, загрузочных и разгрузочных устройств, транспортирующего механизма и рабочей камеры. Собирают эти установки из модулей — устройств, которые легко присоединяются и снимаются. При этом изменяются габариты установки, ее технологический цикл и производительность.

Вакуумная напылительная установка с непрерывным циклом работы (рис. 95) имеет одиннадцать камер I—XI, входной 1 и выходной 7 отсеки. Подложки подаются в держателях 6 в камеры I—IV, где предварительно нагреваются кварцевыми лампами. Рабочими являются камеры V и VII, в которых поочередно напыляются металлические пленки на нижнюю и верхнюю стороны подложек. В буферной камере VI подложки также нагреваются кварцевой лампой. Камеры VIII—XI служат для постепенного охлаждения подложек. Вентили 3 предназначены для дозированной подачи смеси аргона с азотом в рабочие камеры. Перемещаются держатели с подложками специальным толкателем с приводом.

Установка имеет три вакуумные зоны: входную 10, рабочую 9 и выходную 8, в которых соответственно поддерживается давление $1-10^{-2}$, $5 \cdot 10^{-4}$ и $10^{-2} - 1$ Па. В установке использована распылительная система диодного типа, анодом 5 которой служат металлический корпус рабочих вакуумных камер, имеющих диффузионно-щелевые уплотнения 2, и держатели с подложками. Катоды 4 введены в рабочие камеры сверху и снизу.

На смену рассмотренным вакуумным напылительным установкам приходит вакуумное оборудование нового поколения.

Вакуумная установка непрерывного действия "Магна-2М" (рис. 96) предназначена для нанесения тонких одно- и многослойных пленок из алюминия и его сплавов на кремниевые пластины диаметром 76, 100 и 125 мм магнетронным распылением. Установка состоит из двух 1 и 16 шлюзовых и одной 6 рабочей камер, системы транспортных

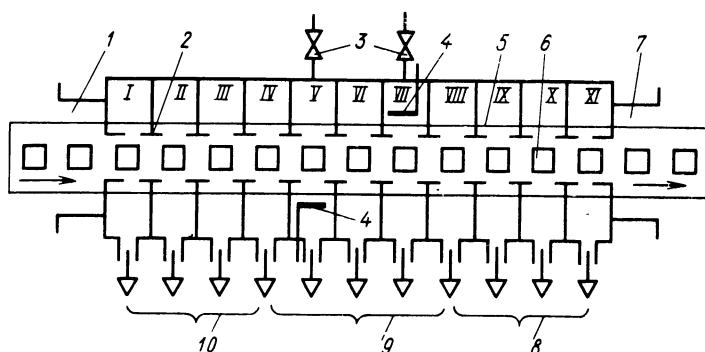


Рис. 95. Схема вакуумной напылительной установки с непрерывным циклом работы:

1, 7 — входной и выходной отсеки, 2 — диффузионно-щелевое уплотнение, 3 — вентили напуска газа, 4 — катоды, 5 — анод, 6 — держатели подложек, 8, 9, 10 — вакуумные зоны с соответствующим давлением; I—XI — камеры

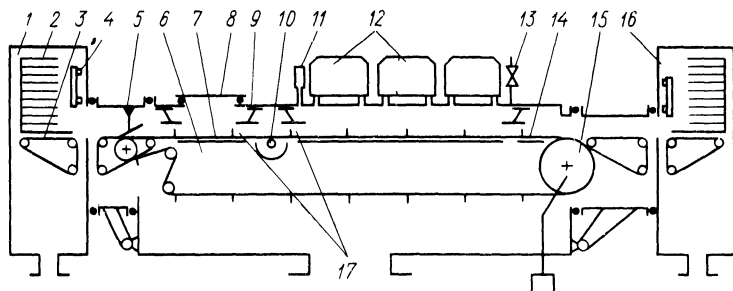


Рис. 96. Вакуумная установка непрерывного действия "Магна-2М" для нанесения однослойных и многослойных тонких пленок магнетронным распылением:

1, 16 — шлюзовые камеры, 2 — кассета, 3 — пассивы подачи пластин, 4 — затвор шлюзовой камеры, 5 — датчик подачи пластин на конвейер, 6 — рабочая камера, 7, 15 — конвейер и его привод, 8 — устройство ионной очистки пластин, 9 — уплотняющая диафрагма, 10 — нагреватель пластин, 11, 13 — датчик давления и вибрационный натекаль аргона, 12 — магнетроны, 14 — стол охлаждения пластин, 17 — щелевые каналы

устройств для перемещения полупроводниковых пластин между кассетами 2, трех магнетронных распылительных устройств (магнетронов) 12 и микропроцессорной системы управления с дисплеем.

Шлюзовые камеры 1 и 16, предназначенные для загрузки и выгрузки кассет 2 с полупроводниковыми пластинами, откачиваются агрегатом АВР-50 с азотной ловушкой в течение определенного времени. При этом в них для очистки напускается аргон. Работа камер так взаимосвязана, что при разгерметизации шлюзовой камеры давление аргона в рабочей почти не изменяется.

Рабочая камера 6 имеет три зоны: предварительной ионной очистки пластин, нагрева их кварцевой лампой и нанесения пленок. Зоны сообщаются через щелевые каналы, но в них поддерживается разное давление. Вакуумная система рабочей камеры представляет собой агрегат, состоящий из паромасляного диффузионного насоса Н-5К, азотной ловушки и механического насоса ВНМ-18Г.

К системе транспортных устройств относятся конвейер 7 и резиновые пассивы 3, подающие полупроводниковые пластины из кассет на конвейер и с конвейера в кассеты.

При работе установки по мере разгрузки и загрузки кассеты 2 с полупроводниковыми пластинами перемещаются конвейером вертикально. Конвейер 7 выполнен в виде двух замкнутых проволочных цепочек, приводимых в движение одним приводом 15. На цепочках имеются штыри, фиксирующие положение полупроводниковых пластин при обработке. При изменении своего положения штыри воздействуют на датчик, который подает сигнал на очередную загрузку пластин на конвейер.

На верхней съемной крышке рабочей камеры размещены планетарные магнетроны с подъемными магнитами, датчик давления и натекаль аргона. В каждом водоохлаждаемом катоде магнетрона закреплена мишень, имеющая значительную массу, что способствует ее длительной работе без

замены. Магнетроны получают питание от индивидуальных источников с отрицательной обратной связью по току разряда и устройством эффективного гашения дуговых разрядов высокого быстродействия.

Управляет работой установки микропроцессор на базе ЭВМ "Электроника-60", который позволяет задавать девять перепрограммируемых технологических режимов, стабилизирует и контролирует их, выполняет необходимые блокировки, считает обрабатываемые полупроводниковые пластины и выдает информацию о состоянии технологических параметров, а также устройств и механизмов установки на дисплей.

§ 40. Изготовление полупроводниковых приборов и микросхем по планарной технологии

Планарная технология была разработана в начале 60-х годов и за короткое время стала основным методом изготовления изделий электронной техники. В настоящее время доля приборов и микросхем, производимых по планарной технологии, составляет около 95%. Процессы планарной технологии считаются универсальными и позволяют в условиях серийного производства получать одновременно групповым способом сотни и тысячи структур полупроводниковых приборов или микросхем с высокими стабильно воспроизводимыми параметрами и минимальным браком. Освоение планарной технологии дало толчок развитию таких новых направлений в электронике, как, например, СВЧ-приборы, полупроводниковые микросхемы и др.

В планарную технологию входит комплекс универсальных процессов, в результате выполнения которых создают в основном на поверхности полупроводниковой пластины активные компоненты — электронно-дырочные переходы (диоды и транзисторы), а также пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, индуктивности).

Важнейшими этапами планарной технологии являются: создание защитного слоя (например, диоксида кремния) на полупроводниковой пластине; получение фотолитографией окон (рисунков) в защитных и металлических слоях; проведение селективной диффузии примесей через окна в защитном слое. Структурная схема процессов планарной технологии при изготовлении транзисторов показана на рис. 97. Основными процессами при этом являются многократно повторяющиеся термическая, фотолитографическая и химическая обработка. Вспомогательные процессы, дополняющие основные, носят разовый характер. К ним относятся механическая обработка, сборка, измерения, испытания и эпитаксия (на рис. 97 не показана). В производстве изделий электронной техники вспомогательные процессы не менее значимы, чем основные.

В структуре транзистора, изготовленного по планарной технологии (рис. 98, а), показаны полупроводниковый кристалл 1, база 2, эмиттер 3, коллектор 4 и не показаны контактные площадки (невыпрямляющие контакты), электродные выводы и защитный слой. В структуре аналогичной микросхемы (рис. 98, б) показаны транзистор 5, диод 8 и резистор 7, в качестве которого использован электронно-дырочный переход (диод), включенный в обратном направлении, а также защитный слой 9 диоксида

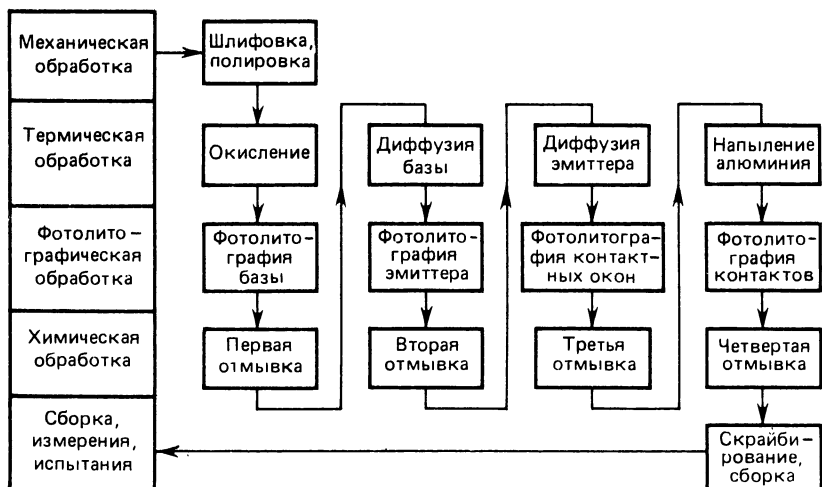


Рис. 97. Структурная схема процессов планарной технологии при изготовлении транзисторов

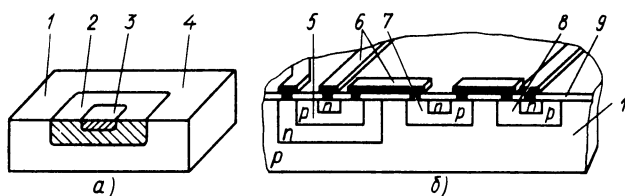


Рис. 98. Структура планарных транзистора (а) и микросхемы (б):

1 — полупроводниковый кристалл, 2 — база, 3 — эмиттер, 4 — коллектор, 5 — транзистор, 6 — алюминиевая токопроводящая дорожка и межсоединение, 7 — резистор, 8 — диод, 9 — пленка диоксида кремния

кремния, алюминиевые токопроводящие дорожки и межсоединения 6. Соотношения размеров, например транзисторной структуры, таковы: в плане несколько десятков мкм, а по глубине примерно в пять раз меньше.

Дальнейшее улучшение таких параметров изделий микроэлектроники, как повышение быстродействия, мощности, усиления, надежности, а также снижение шумов, может быть осуществлено главным образом усовершенствованием методов диффузии, фотолитографии и переходом к другим более совершенным технологическим приемам.

Планарная технология объединила такие технологические процессы, как механическая обработка, окисление, диффузия, эпитаксия, напыление металлических пленок, фотолитография, с помощью которых создаются структуры полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяют металлические пленки в производстве полупроводниковых приборов?
2. Какие пленки являются тонкими и какие толстыми?
3. Какими способами наносят тонкие пленки и как их измеряют?
4. Как наносят толстые пленки и для чего их применяют?
5. На каком принципе основано ионно-плазменное травление и чем оно отличается от жидкостного химического?
6. Каково устройство вакуумной установки для нанесения тонких пленок?
7. Как изготавливают полупроводниковые приборы и микросхемы по планарной технологии и каковы ее достоинства?

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. ТЕХНОЛОГИЯ СБОРОЧНЫХ РАБОТ

§ 41. Общие сведения о монтаже кристаллов

Монтаж кристаллов в корпуса (на ножки), на кристаллодержатели или платы должен обеспечивать прочное механическое соединение, надежный электрический контакт, хороший теплоотвод и зависит от конструкции, назначения и условий эксплуатации полупроводниковых приборов и микросхем. При монтаже кристаллов используют четыре метода их присоединения: стеклом и пластмассой, пайкой низкотемпературными (мягкими) припоями и эвтектической пайкой.

Достоинствами присоединения кристаллов стеклом являются низкая стоимость, хорошее согласование по КТР с соединяемыми материалами, а также возможность выполнения в многовыводных корпусах ДИП с пластмассовой герметизацией одновременного монтажа кристаллов и выводных рамок (выводов). Однако при этом не обеспечиваются электрический контакт кристаллов с корпусами и хороший теплоотвод. Кроме того, стекло имеет сравнительно высокую температуру размягчения (около 500°С), что может ухудшить параметры полупроводниковых приборов и микросхем.

Поэтому монтаж стеклом применяют при массовом производстве мало-мощных однокристалльных полупроводниковых приборов, в которых не требуется электрическое соединение нижней поверхности кристаллов с корпусами или держателями. Стекло в виде пасты наносят методом трафаретной печати на место монтажа (контактную площадку), размягчают, нагревая корпус, и укладывают кристалл, охлаждая затем до комнатной температуры.

По сравнению со стеклом пластмасса более широко применяется для монтажа кристаллов, так как этот процесс довольно прост, обеспечивает достаточную прочность и надежность соединения, имеет низкую температуру отверждения, что исключает ухудшение параметров приборов и микросхем вследствие перегрева. В то же время пластмасса обладает низкой теплопроводностью и не допускает замены дефектных кристаллов. В отдельных случаях затруднено присоединение электродных выводов термокомпрессией вследствие перегрева пластмассы, поэтому используют ультра-

звуковую сварку. В герметично закрытых корпусах возможно выделение из пластмассы газов.

Среди пластмасс наибольшее распространение для монтажа кристаллов получили эпоксидные смолы (органический клей), которые лишены указанных недостатков, так как образуют прочные соединения, работающие при высоких температурах. Для повышения тепло- или электропроводности в эпоксидную смолу вводят металлические наполнители. Наносят эпоксидную смолу на корпуса вручную или автоматически небольшими каплями. Иногда пластмассу применяют в виде таблеток.

Монтаж кристаллов низкотемпературной пайкой имеет ограниченное применение вследствие сравнительно низкой температуры плавления мягких припоев. Так, эвтектический припой золото (80%) — олово (20%) плавится при 280°C , а эвтектический припой олово (63%) — свинец (37%) — при 183°C . Поэтому такой монтаж кристаллов может выполняться при изготовлении полупроводниковых приборов и микросхем, работающих при максимальной температуре до 80°C .

Достоинством этого вида присоединения кристаллов является легкость их демонтажа при необходимости. Для этого корпус нагревают до температуры плавления припоя и снимают кристалл с контактной площадки. Низкотемпературный припой обычно используют в виде таблеток (дисков), а в производстве толстопленочных гибридных микросхем наносят на контактные площадки методом трафаретной печати.

Кремниевые полупроводниковые приборы и микросхемы должны работать при максимальной температуре окружающей среды $125\text{--}150^{\circ}\text{C}$. При сборке полупроводниковые приборы и микросхемы последовательно трижды нагревают: при монтаже кристаллов, присоединении электродных выводов и герметизации. Температура плавления припоя, используемого на предыдущей операции, должна быть минимум на 50°C выше температуры плавления припоя, используемого на последующей операции. Поэтому минимальная температура нагрева при первой термической операции должна быть несколько больше 300°C . Припоев с такой температурой плавления нет.

Эвтектические припои золото — кремний и золото — германий, имеющие температуру плавления соответственно 370 и 356°C , получили наибольшее распространение при монтаже кристаллов в корпуса или на держатели. Пайка этими припоями, называемая эвтектической, подразделяется на контактно-реактивную и эвтектическими сплавами.

§ 42. Контактно-реактивная пайка

Контактно-реактивной или контактно-реакционной называется пайка, при которой между соединяемыми металлами в результате контактного плавления образуется эвтектический сплав, заполняющий зазор и кристаллизующийся с образованием паяного соединения. Применяют такую пайку для присоединения полупроводниковых кристаллов к золоченым ножкам. При этом образуются эвтектические сплавы золото — германий или золото — кремний. Скорость контактного плавления полупроводника и золота зависит от температуры и усилия, прилагаемого к соединяемым кристаллу

и ножке. Изменяя температуру, можно управлять контактным плавлением; уменьшая ее, останавливать процесс пайки в нужный момент, а увеличивая, возобновлять его.

Образующаяся при пайке эвтектика, например золото — кремний, имеет высокую активность, хорошо смачивает твердые поверхности и при кристаллизации дает прочное и сплошное соединение. Малое содержание кремния (до 6%) в эвтектике золото — кремний исключает опасность проплавления кристалла, так как плавится в основном золото. После перехода всего золотого покрытия в зоне контакта в жидкую фазу процесс плавления прекращается.

В установках контактно-реактивной пайки столик, на котором подогреваются ножки (держатели), обычно нагревают до температуры $(410 \pm 10)^\circ\text{C}$. Оптимальным считается усилие, равное 0,5–0,7 Н, прикладываемое к инструменту при контактно-реактивной пайке. Увеличение усилия приводит к образованию сколов и трещин в кристаллах.

Условно контактно-реактивную пайку можно разделить на две стадии. На первой стадии происходит взаимное растворение в очень тонком контактном слое соединяемых металлов в твердом состоянии, что способствует увеличению энергии кристаллической решетки (энергии, необходимой для ее разрушения) и расплавлению твердого раствора. На второй стадии интенсифицируется диффузия, в результате чего атомы из расплава одного компонента переходят в твердую фазу другого компонента, переводя в жидкое состояние все новые слои контактирующих металлов.

Контактно-реактивная пайка существенно изменяет структуру и свойства материалов в месте их соединения. Так, в эвтектическом сплаве золото — кремний под действием нагрева может произойти его ликвация (расслоение), что снизит прочность, теплопередачу и электропроводность паяного соединения. Для устранения этого явления и активации соединяемых поверхностей, заключающейся в разрушении оксидных пленок, контактно-реактивную пайку выполняют с ультразвуковым воздействием (амплитуда 0,05–0,08 мм) на кристалл. В результате этого кристалл получает возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости и как бы притирается к фланцу ножки, происходит контактное плавление кремния и золота, жидкий сплав перемешивается и процесс соединения ускоряется. Жидкая фаза способствует диспергированию (измельчению) оксидных пленок и их удалению из зоны контакта.

Контактно-реактивной пайкой получают надежные соединения кристаллов с золочеными фланцами ножек при толщине покрытия не менее 6 мкм и оптимальном режиме. При нарушениях режима пайки в кристаллах появляются трещины и сколы. Золочение контактируемых поверхностей кристаллов уменьшает, но полностью не исключает образование на них сколов.

При контактно-реактивной пайке (рис. 99, а, б) полупроводниковый кристалл 2 подается на золоченую поверхность ножки 3 и удерживается в течение времени пайки (обычно 5–7 с) вакуумным пинцетом 1 (инструментом).

Для создания физического контакта соединяемых поверхностей (освобождения от оксидных пленок и наиболее плотного контакта деталей)

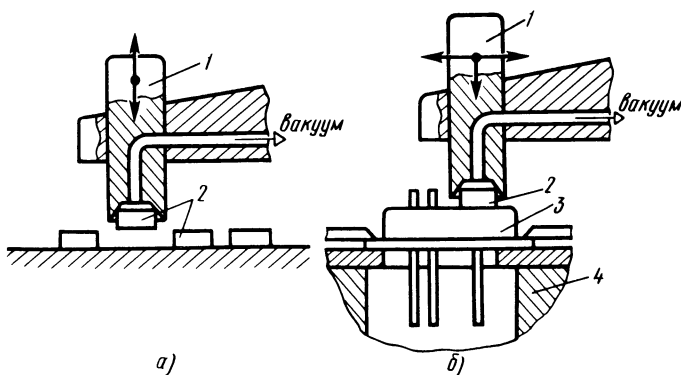


Рис. 99. Контактно-реактивная пайка:
 а — захват кристалла, б — присоединение кристалла к ножке; 1 — вакуумный пинцет, 2 — кристаллы, 3 — ножка (корпус), 4 — нагреватель

через вакуумный пинцет подают ультразвуковые колебания, которые, передаваясь кристаллу, заставляют его колебаться в горизонтальном направлении и он притирается к золотому покрытию ножки. Одновременно к вакуумному пинцету прикладывают усилие, которое также передается кристаллу, прижимая его к ножке. Пайку выполняют в среде инертного газа, подогревая ножку нагревателем 4.

§ 43. Пайка эвтектическими сплавами

Пайкой эвтектическими сплавами присоединяют полупроводниковые кристаллы к ножкам (корпусам). В отличие от контактно-реактивной пайки в этом случае эвтектический сплав образуется не в результате контактного плавления соединяемых материалов, а вводится в качестве припоя между соединяемыми поверхностями кристалла и ножки. Золочение контактирующих поверхностей каких-либо ощутимых результатов не дает. В качестве эвтектических используют сплавы золото — германий или золото — кремний, диаграммы состояния которых показаны на рис. 100, а, б.

Подготовленные к пайке детали нагревают в нейтральной атмосфере (осушенном и очищенном азоте) до температуры, несколько превышающей температуру плавления эвтектического сплава. Эвтектические сплавы золото — германий и золото — кремний содержат (по массе): первый 12% германия и 88% золота, а второй — 6% кремния и 94% золота. Температура плавления эвтектик золото — германий и золото — кремний, соответственно равная 356 и 370°С, ниже температуры плавления каждого из этих материалов. Эвтектические сплавы являются смесью, а не химическим соединением.

Использование для пайки эвтектического сплава золото — кремний дает хорошие результаты, но сложность приготовления ограничивает его применение. Кроме того, при изготовлении происходит расслоение сплава золото — кремний, поэтому чаще применяют эвтектический сплав золото —

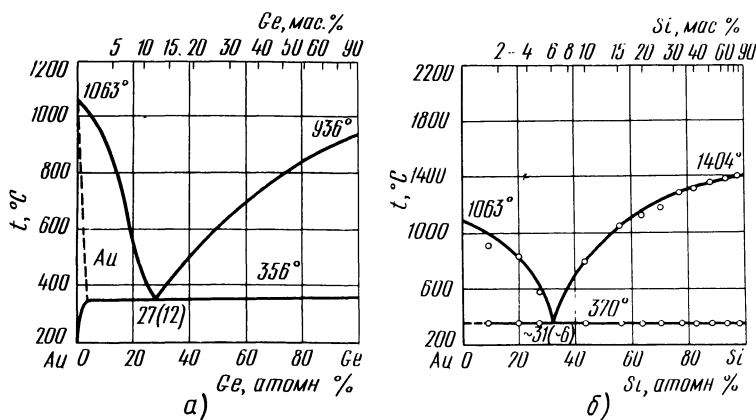


Рис. 100. Диаграммы состояния сплавов:
 а — золото — германий, б — золото — кремний

германий 3лГр12. Примерный режим пайки эвтектическим сплавом 3лГр12 на специальной установке приведен ниже.

Температура поверхности столика, °C	410 ± 10
Усилие на инструменте, Н	0,6 — 0,7
Амплитуда колебаний инструмента, мм	0,08
Время пайки, с.	7

При климатических (на термоциклирование) и механических (на вибропрочность и многократные удары) испытаниях выполненные таким образом паяные соединения кристаллов с ножками не разрушаются.

По сравнению с контактно-реактивной пайкой пайка эвтектическими сплавами имеет ряд достоинств. Так как эвтектические сплавы имеют невысокую температуру плавления, хорошие жидкотекучесть и способность смачивания, а также незначительное время нагрева до температуры пайки, в паяном соединении не создаются большие остаточные напряжения, образующиеся вследствие разницы КТР соединяемых материалов. Введение эвтектического сплава между соединяемыми поверхностями способствует сглаживанию на них шероховатостей и неровностей.

Нерастекшийся припой свидетельствует о плохой смачиваемости им золоченой поверхности ножки и кристалла или о недостаточно высокой температуре пайки, что является одной из причин низкой прочности паяного соединения. Появление трещин и сколов на кристаллах связано с большим усилием, прикладываемым к рабочему инструменту, или слишком резким подъемом температуры пайки по сравнению с оптимальной.

Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом состоит из четырех операций: захвата прокладки 1 из эвтектического сплава, ее переноса и укладки на место пайки (рис. 101, а, б), захвата кристалла б, переноса и присоединения его к ножке (корпусу) 3 (рис. 101, в, г). Захват, перенос и удержание прокладки (кристалла) выполняются специальным инстру-

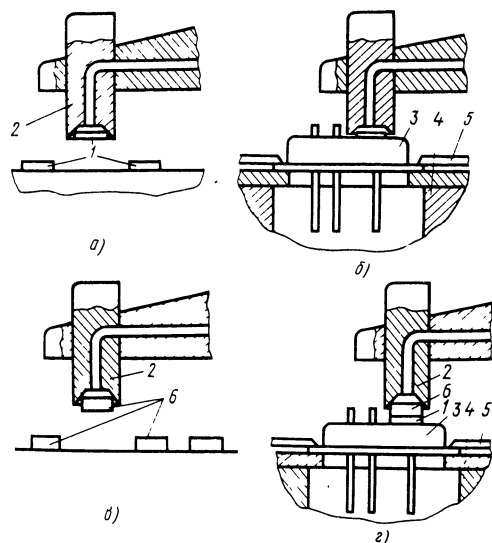


Рис. 101. Пайка кристалла к ножке эвтектическим сплавом:

а, б — захват и укладка прокладки на ножку, *в, г* — захват и укладка кристалла на прокладку и их пайка; *1* — прокладки, *2* — инструмент (вакуумный пинцет), *3* — ножка, *4* — нагреватель, *5* — устройство прижима ножки к нагревателю, *б* — кристаллы

ментом — вакуумным пинцетом 2. При этом усилие захвата и удержания прокладки (кристалла) создается вследствие перепада давлений (атмосферного и разрежения).

§ 44. Общие сведения о присоединении электродных выводов

Создание между контактными площадками полупроводниковых кристаллов (подложек) и корпусов надежного электрического контакта, способного безотказно работать в различных условиях эксплуатации, является важным технологическим процессом производства полупроводниковых приборов и микросхем. Присоединение тонких алюминиевых или золотых проволочек — электродных выводов — до настоящего времени остается малопроизводительной, трудоемкой, низконадежной операцией, которую выполняют на специальных установках с визуальным наблюдением и ручным ориентированием инструмента, проволоки и места присоединения. В отдельных случаях стоимость присоединения электродных выводов составляет 50% стоимости микросхемы; половина всех отказов микросхем также происходит из-за нарушения электрического контакта.

Методы присоединения электродных выводов можно разделить на проволочные и беспроводные. К проволочным — наиболее распространенным методам — относятся термокомпрессионная (термокомпрессия), ультразвуковая и микроконтактная сварка, а также пайка, подробно рас-

смотренные в следующих параграфах. Ознакомимся с беспроводными методами, имеющими незначительное, но перспективное применение. К беспроводным методам (отсутствие проволочных электродных выводов) относят монтаж перевернутого кристалла (флип-чип) и кристалла с балочными выводами.

При монтаже перевернутого кристалла (рис. 102, а) вместо проволочных выводов используют выступы (столбики) 2 высотой в десятки доли миллиметра, расположенные в определенных местах полупроводникового кристалла 1. Естественно, что все необходимые соединения на кристалле электрически связывают с выступами. Кристалл переворачивают выступами вниз, опускают на подложку 3 с точно расположенными участками металлизации 4, прикладывают давление и подводят теплоту для образования соединения выступов с подложкой.

Выступы на кристаллах могут быть изготовлены из низкотемпературного (мягкого) припоя, а также гальваническим осаждением алюминия или золота. В тех случаях, когда выступы получают гальваническим осаждением, кристаллы присоединяют термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой.

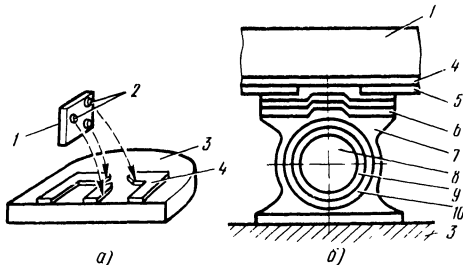
Монтаж перевернутого кристалла имеет несколько разновидностей. Например, в качестве выступов используют медные шарики (рис. 102, б). Для этого в кремниевом кристалле 1, имеющем контактные площадки, покрытые пленкой 5 диоксида кремния, изготовляют окна, в которые осаждают три слоя 6 (хрома, хрома с медью и хрома с оловом). Затем на них наносят оловянистый припой 7 и укладывают медный никелированный шарик 8, который закрепляют оплавлением мягкого припоя 10. При совмещении такого выступа с предварительно облуженной контактной площадкой подложки 3 и последующем нагреве с приложением давления на кристалл происходит пайка, обеспечивающая надежное соединение.

Кроме того, применяют монтаж кристаллов, при котором выступы из мягкого припоя имеют контролируемую осадку (рис. 103, а—д). В пленке 2 диоксида кремния изготовляют окна, в которые гальваническим способом на слой металлизации 3 осаждают припой 1 (рис. 103, а). При нагревании кристалла (пластины) 4 припой принимает форму сферического выступа 5 (рис. 103, б).

Затем кристалл переворачивают выступом вниз (рис. 103, в), совмещают с подложкой 7 и нагревают. Выступ расплавляется и взаимодействует с предварительно облуженной контактной площадкой 6 подложки (рис. 103, г), образуя столбик припоя 8 (рис. 103, д). Силы поверхностного на-

Рис. 102. Монтаж перевернутого кристалла:

а — с выступами, б — с шариками; 1 — кристалл, 2 — выступы, 3 — подложка, 4 — алюминиевая металлизация, 5 — пленка диоксида кремния, 6, 9 — слои хрома и никеля, 7, 10 — припой, 8 — медный шарик



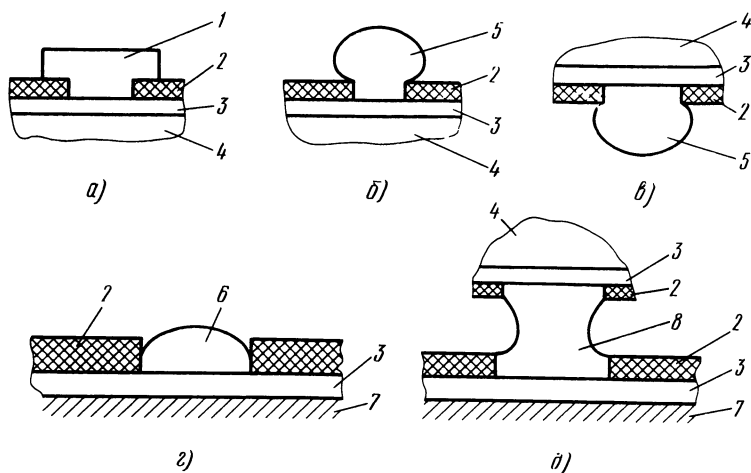


Рис. 103. Монтаж кристалла с контролируемой осадкой выступов:
а, б — нанесение гальваническим способом припоя и оплавление его, *в* — переворачивание кристалла, *г* — нанесение припоя на подложку, *д* — монтаж кристалла на подложку; 1 — припой, нанесенный на кристалл, 2 — пленка диоксида кремния, 3 — металлизация, 4 — кристалл, 5 — оплавленный припой, 6 — контактная площадка подложки, 7 — подложка, 8 — столбик припоя

тяжения расплавленного припоя устанавливают кристалл точно на свое место. Так как остальные поверхности кристалла и подложки закрыты пленкой 2 диоксида кремния, не смачиваемой припоем, кристалл припаяется на некотором расстоянии от подложки, что исключает закорачивание выступов.

Достоинством монтажа перевернутого кристалла является то, что все соединения выполняются одновременно. Это повышает также их надежность. Кроме того, при монтаже мягким припоем облегчается демонтаж бракованных кристаллов. Пластичность мягкого припоя частично компенсирует температурные напряжения в соединении.

Однако этот метод монтажа довольно дорог, так как сложны подготовительные операции подложек (пластин); не обеспечивает хороший теплоотвод от кристаллов; возможны локальные перегревы вследствие некоторой разницы температур в процессе монтажа; при нарушении технологического процесса сборки могут образовываться закоротки между элементами кристаллов и подложек.

При монтаже кристаллов с балочными выводами и применены балки — выводы, выходящие за габарит кристалла (рис. 104, *а*). Наиболее рациональным считается гребенчатое расположение балочных выводов, что экономит площадь полупроводниковой пластины. К слою металлизации 3 на подложке 4 кристалл 2 с балочными выводами 1 обычно присоединяют термокомпрессионной или ультразвуковой сваркой. Балочные выводы получают на пластине, еще не разрезанной на кристаллы (по групповой технологии изготовления полупроводниковых приборов). Для этого на ее поверхности со структурами в пленке диоксида кремния

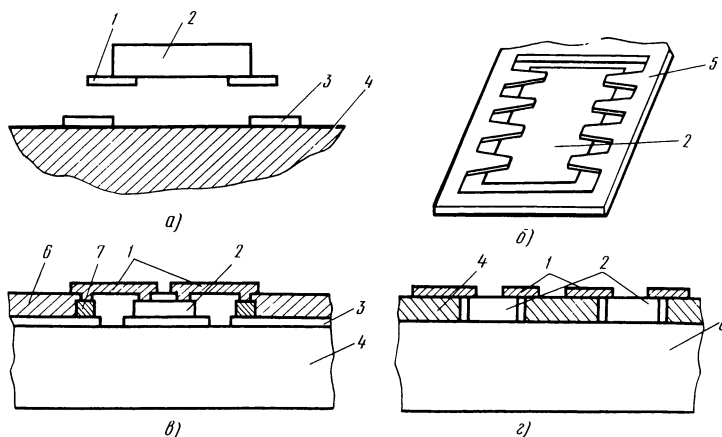


Рис. 104. Монтаж кристаллов с балочными выводами:

а — конструкция кристалла, *б* — паучковое соединение, *в* — балочные выводы, изготовленные напылением, *г* — балочные выводы, изготовленные на подложке; 1 — балочные выводы, 2 — полупроводниковый кристалл, 3 — слой металлизации, 4 — подложка, 5 — паучок, 6 — пластмассовая пленка, 7 — столбик, 8 — металлическое основание

создают окна, в которые наносят золото, образующее балочные выводы, а затем травлением разделяют пластину на отдельные кристаллы.

Разновидностями монтажа кристаллов с балочными выводами являются паучковое соединение и соединение, получаемое напылением балочных выводов.

Паучковое соединение (рис. 104, б) целесообразно применять, когда количество выводов более десяти. Балки в виде паучка 5 вырубают из ленты алюминиевой фольги, накладывают на кристалл 2 и присоединяют, например термокомпрессией, к контактным площадкам. Затем разделяют паучок на отдельные выводы и монтируют микросхему в перевернутом виде в аппаратуре.

При соединении напылением (рис. 104, в) после выполнения всей пленочной разводки на нужных местах подложки создают столбики 7, монтируют между ними кристалл 2, сверху накрывают пленкой термопластичного материала (например, фторированным этиленпропиленом) 6 и получают фотолитографией в пластмассе окна, оставляя незащищенными столбики и лицевые поверхности кристаллов. Затем вакуумным напылением в окна наносят золотую металлизацию (балочные выводы 1), соединяющую кристаллы со столбиками.

Балочные выводы можно получать на подложке (рис. 104, г). Для этого предварительно напылением и фотолитографией создают на подложке 4 пленочные балочные выводы, а также отверстия, в которые помещают кристаллы 2, присоединяя их нижнюю сторону к металлическому основанию 8 (это способствует улучшению теплоотвода), а верхнюю соединяют термокомпрессией с балочными выводами.

Достоинствами монтажа кристаллов с балочными выводами являются улучшение условий теплоотвода от кристаллов, отсутствие их разрушений

при монтаже на подложках, так как давление прикладывается к балочному выводу, а также возможность визуального контроля качества монтажа. В то же время такой монтаж в два раза дороже монтажа перевернутых кристаллов, так как требуется дополнительная металлизация и допустимы незначительные отклонения подложек от плоскостности. Кроме того, балочные выводы легко изгибаются (их сечение обычно 13×76 мкм) и ломаются.

Необходимо отметить, что беспроводные соединения целесообразно применять в массовом производстве при выпуске полупроводниковых приборов и микросхем не менее чем несколько миллионов.

§ 45. Термокомпрессионная сварка

Термокомпрессия — это процесс соединения двух материалов, находящихся в твердом состоянии, при воздействии на них теплоты и давления. Причем температура нагрева соединяемых термокомпрессией материалов не должна превышать температуру образования их эвтектики и один из материалов (обычно электродного вывода) должен быть пластичным.

Получение прочного соединения термокомпрессионной сваркой можно объяснить следующим образом. Как известно, идеальных поверхностей не существует. В микроскоп при сильном увеличении можно увидеть, что на поверхностях полупроводникового кристалла и электродной проволоки (вывода) имеется множество микровыступов и микровпадин. Если приложить давление к электродному выводу, изготовленному из пластичного материала, и нагревать, например, полупроводниковый кристалл, произойдет пластическая деформация микровыступов электродного вывода, а также частичная деформация микровыступов полупроводника и взаимное затекание соединяемых материалов в микровпадины, т.е. термокомпрессионная сварка.

При термокомпрессионной сварке образуется прочная адгезия между полупроводниковым кристаллом и электродным выводом и создается надежный электрический контакт. Следует отметить, что чем пластичнее материал электродных выводов, тем большим коэффициентом адгезии он обладает. Так, золото и алюминий по сравнению с другими материалами, используемыми для электродных выводов (медь, серебро), имеют наибольший коэффициент адгезии, соответственно равный 1,84 и 1,80.

В производстве полупроводниковых приборов и микросхем термокомпрессией соединяют следующие пары металлов: золото — кремний, золото — германий, золото — алюминий, золото — золото, алюминий — алюминий, золото — серебро и алюминий — серебро.

Присоединение электродных выводов термокомпрессией может быть выполнено в виде одной или нескольких плоских точек, шарика, а также встык (шариком) и внахлестку (остальные виды термокомпрессии). Рассматривая присоединение электродных выводов термокомпрессией, обычно имеют в виду, что сварка выполняется, как правило, в двух местах: один конец вывода приваривают к контактной площадке кристалла (первая сварка), а второй — к траверсе (выводу) корпуса или ножки (вторая сварка). В зависимости от принятого технологического процесса присое-

динения выводов (в это понятие входит также оборудование, конструкция инструмента) термокомпрессию разделяют на шариковую, клином и сшиванием.

Ш а р и к о в а я т е р м о к о м п р е с с и я (рис. 105, а) каких-либо особых пояснений не требует. Следует только отметить, что шарик 5 на конце проволочного вывода может быть получен оплавлением электродной проволоки 1 в пламени водородной горелки 4 или прикосновением к электрическому разряднику. При оплавлении в водородном пламени получают два шарика или один.

При получении двух шариков один остается свободным на конце уже присоединенного вывода, а другой находится в капилляре 3 (инструменте) и предназначен для приварки очередного электродного вывода к кристаллу 7 и контактной площадке 8. Один шарик в водородном пламени получают в том случае, если горелку используют только для оплавления конца проволоки в шарик, выходящий из капилляра, а не для отделения присоединенного электродного вывода от проволоки при второй сварке.

С помощью разрядника на конце проволоки образуется только один шарик, которым электродный вывод присоединяют к контактной площадке кристалла. Второй конец электродного вывода в этом случае приваривают к корпусу 9 внахлестку.

Т е р м о к о м п р е с с и я к л и н о м (рис. 105, б) довольно сложна для выполнения, так как сначала необходимо совместить контактную площадку 8 кристалла 7 с инструментом, конец электродной проволоки 1 (вывода) с концом инструмента — клина 11, а затем после сварки, вытянув проволоку из сопла 12, проделать те же манипуляции для присоединения второго конца проволоки 1 к корпусу 9. Далее следует отделение электродного вывода от остальной части проволоки обрывом, ножницами, перерезанием иглой о край траверсы (вывода корпуса) или обрезкой специальным устройством.

Обрезка проволоки специальным устройством считается лучшим способом, так как ее конец не сплющивается (сплюснутый конец непригоден для следующей приварки) и не остается длинных отрезков, которые, кроме того что увеличивают расход проволоки (обычно золотой), могут быть причиной образования закороток.

П р и т е р м о к о м п р е с с и и с ш и в а н и е м (рис. 105, в) инструмент представляет собой капилляр 3 с вертикальным осевым отверстием. Иногда такой вид термокомпрессии называют петлевым. Процесс создания проволочных перемычек между кристаллом 7 и корпусом 9 в этом случае во многом напоминает обычное шитье. Только при шитье нитка проходит через боковое отверстие иголки, а при термокомпрессии сшиванием — через вертикальное осевое отверстие инструмента.

После приварки конца электродной проволоки 1 к кристаллу 7 ее вытягивают через капилляр 3, совмещают его с контактной площадкой 8, выполняют вторую сварку, а затем обрезают ножницами 13, загибая свободный конец под инструмент.

Т е р м о к о м п р е с с и ю и н с т р у м е н т о м в в и д е п т и ч ь е г о к л ю в а (рис. 105, г) относят к термокомпрессии сшиванием. Главное отличие этих видов присоединения электродных выводов заключается

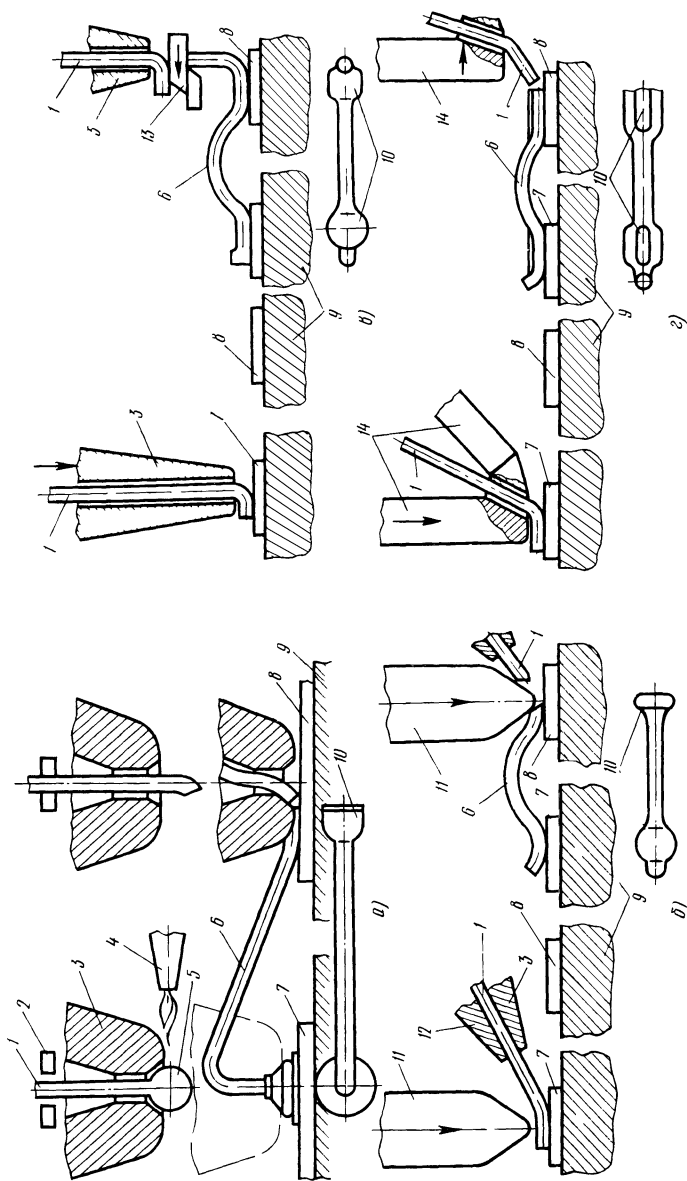


Рис. 105. Виды термокомпрессионной сварки:

а — шариком, б — клином, в — сшиванием, г — птичьим клювом; 1 — электродная проволока, 2 — зажимное устройство, 3 — капилляр, 4 — водородная горелка, 5 — шарик, 6 — электродный вывод, 7 — кристалл, 8 — контактная площадка, 9 — корпус (подложка), 10 — форма места соединения, 11 — клин, 12 — сопло, 13 — ножницы, 14 — птичий клюв

в устройстве инструмента — птичьего клюва 14, состоящего из двух частей, между которыми пропускают электродную проволоку 1. После выполнения обеих сварок проволоку обрывают, перемещая инструмент в сторону от места сварки. Этот инструмент сложен для изготовления и в эксплуатации, поэтому имеет ограниченное применение в производстве, но в то же время обеспечивает высокую прочность соединения, так как на электродном выводе образуется его отпечаток 10 с ребром жесткости.

Необходимо отметить, что каждый способ термокомпрессии характеризуется своим отпечатком инструмента на электродном выводе.

Наиболее производительной считается шариковая термокомпрессия, но ее применяют при сборке полупроводниковых приборов, с большими контактными площадками, используя электродную проволоку диаметром более 20 мкм. Ниже приведены ориентировочные режимы термокомпрессии. Так, при термокомпрессировании золотой электродной проволоки к кремниевому кристаллу температура нагрева составляет 350–380°С, давление 60–100 МН/м², а время выдержки 2–20 с. При соединении золотой проволоки с золотом, напыленным на пленку диоксида кремния, температура нагрева должна быть 250–370°С, давление 60–100 МН/м², а время 0,5–2 с.

Основным достоинством термокомпрессионной сварки является то, что с ее помощью можно без применения флюса и припоев соединять металлы в твердом состоянии при сравнительно низких температурах и малой их деформации (10–30%) как на воздухе, так и в атмосфере формирующего газа или сухого водорода. Термокомпрессией сваривают такие пластичные металлы, как алюминий и золото с тонкими нанесенными на полупроводники металлическими пленками, некоторыми проводниками (медью, коваром) и диэлектриками (ситаллом, диоксидом кремния). Кроме того, термокомпрессия обладает сравнительно высокой технологичностью, заключающейся в простоте подбора режимов и изготовления оборудования, а также возможности контроля качества сварки.

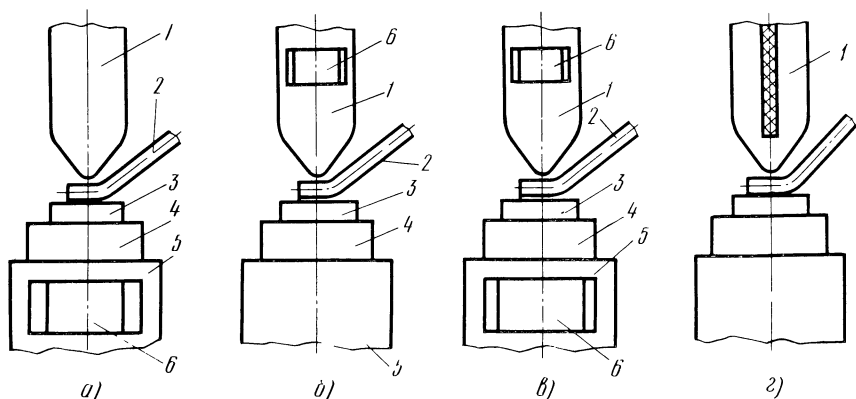


Рис. 106. Разновидности термокомпрессионной сварки по способу нагрева столика (а), инструмента (б), столика и инструмента (в) и пропусканием электрического тока через инструмент (з):

1 — инструмент, 2 — электродная проволока, 3 — кристалл, 4 — корпус (подложка), 5 — столик, 6 — нагреватель

Недостатки термокомпрессии — ограниченное число пар свариваемых металлов; высокие требования к качеству соединяемых поверхностей и сравнительно низкая производительность труда (обычно сварку выполняют под микроскопом).

Для присоединения электродных выводов термокомпрессией используют специальные установки, отличающиеся внешним оформлением и некоторыми особенностями конструкции, в основу которых заложены три технологических признака: способ нагрева, конструкция инструмента и вид термокомпрессионной сварки. В различных установках термокомпрессии могут нагреваться столик (рис. 106, а), инструмент (рис. 106, б) или инструмент и столик одновременно (рис. 106, в).

Разновидностью термокомпрессии является сварка косвенным импульсным нагревом (СКИН) инструмента из жаропрочного материала, служащего проводником электрического тока (рис. 106, г). При импульсном пропускании электрического тока происходит кратковременный перегрев инструмента, в результате чего им можно сваривать электродные выводы из малопластичных металлов (меди, серебряного сплава) с тонкими металлическими пленками, нанесенными на керамику или полупроводник.

§ 46. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка — это процесс соединения двух материалов, находящихся в твердом состоянии, при незначительном нагреве с приложением определенного давления и колебаний ультразвуковой частоты. При ультразвуковой сварке температура нагрева в зоне контакта не превышает 50–60% от температуры плавления соединяемых материалов. Контактное давление, подбираемое опытным путем, зависит от механических свойств свариваемых материалов и размеров изготовленных из них деталей. Обычно деформация деталей, соединяемых ультразвуковой сваркой, не превышает 5–20% их первоначальных размеров.

Ультразвуковую сварку выполняют в интервале частот от 18 до 250 кГц. Ультразвуковые колебания, воздействуя на соединение, нагревают его, освобождают от загрязнений и оксидов, ускоряют пластическую деформацию электродных выводов, зачищают поверхности в зоне контакта, в результате чего происходит сближение физически чистых поверхностей на расстояние действия межатомных сил, взаимная диффузия и прочное соединение двух материалов.

При ультразвуковой сварке не используют флюсы и припои, что является ее основным достоинством. Кроме того, этим способом можно соединять разнородные, разнотолщинные и трудносвариваемые материалы. Так, с помощью ультразвука хорошо свариваются: электродные выводы из золота и алюминия с золотым покрытием, нанесенным на ситалл по подслою нихрома; алюминиевые электродные выводы с алюминиевой пленкой, нанесенной на стекло, кремний или диоксид кремния; золотые, алюминиевые и медные провололочные выводы микросхем с золотым покрытием, осажденным на ковар по подслою никеля.

Установки ультразвуковой сварки оснащаются различными системами передачи ультразвуковых колебаний к месту контакта свариваемых мате-

риалов. Так, для приварки проволочных выводов микросхем обычно применяют ультразвуковую продольно-поперечную колебательную систему с инструментом, совершающим колебания изгиба (рис. 107).

Ультразвуковые колебания от преобразователя 1 передаются по концентратору (волноводу) 2 к расположенному перпендикулярно ему сварочному инструменту 3, который, в свою очередь, передает их проволочному электродному выводу 4 и кристаллу 5. Инструмент, совершая колебания изгиба, воздействует на электродный вывод, притирая его к кристаллу. При этом поверхности контакта очищаются, нагреваются, сближаются и происходит взаимная диффузия атомов, в результате чего образуется прочное соединение электродного вывода с кристаллом.

Прочность соединений, полученных ультразвуковой сваркой, зависит от амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний инструмента, контактного усилия, прикладываемого к свариваемым деталям, времени сварки и мощности колебательной системы.

Амплитуду и частоту колебаний инструмента для каждой пары материалов определенной толщины подбирают опытным путем, так как от них зависит динамическая нагрузка, передаваемая свариваемым изделиям в зоне контакта. Так, для материалов небольшой толщины используют малые амплитуды (0,005—0,015 мм) и повышенные частоты (до 100 кГц).

Пластическая деформация материалов зависит от их физико-механических свойств, толщины и приложенного контактного усилия, а также состояния поверхностей. Так, для электродных выводов диаметром от 20 до 50 мкм контактное усилие лежит в пределах 0,05—1 Н (5—100 гс).

Мощность колебательной системы определяется конструкцией установки, а время сварки зависит от выбранных амплитуды и частоты колебаний инструмента, контактного усилия, а также свойств свариваемых материалов, их толщины и обычно равно от нескольких сотых до нескольких десятых долей секунды.

Свариваемые поверхности должны быть чистыми, не иметь жировых пленок и грубых дефектов. Следует помнить, что основным условием высококачественной ультразвуковой сварки является свободное контактирование соединяемых поверхностей.

Интенсификации процесса ультразвуковой сварки способствует косвенный импульсный нагрев инструмента. Одновременное воздействие ультразвуковых колебаний и импульсного нагрева инструмента на соеди-

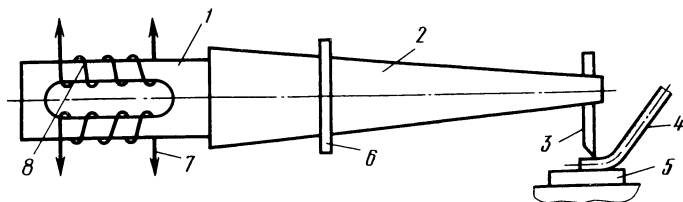


Рис. 107. Ультразвуковая продольно-поперечная колебательная система:

1 — преобразователь (вибратор), 2 — концентратор (волновод), 3 — инструмент, 4 — электродный вывод, 5 — кристалл, 6 — устройство крепления, 7, 8 — обмотки возбуждения и подмагничивания

няемые материалы повышает прочность сварного соединения при меньшей деформации выводов и позволяет соединять между собой трудносвариваемые материалы.

§ 47. Оборудование для монтажа кристаллов в корпуса и присоединения электродных выводов термокомпрессионной и ультразвуковой сваркой

Полуавтоматическая установка ЭМ-4025, предназначенная для эвтектической пайки кристаллов гибридных микросхем в плоские корпуса, имеет координатный столик, револьверную головку и наборное поле. Температура нагрева корпуса и время пайки поддерживаются по заданной программе.

Координатный столик автоматически перемещается во взаимно перпендикулярных направлениях с помощью двух шаговых электродвигателей и, кроме того, может вращаться, а также при монтаже кристаллов колебаться с заданными частотой и амплитудой. На столике смонтированы нагреватель и фиксаторы для закрепления корпуса. Газовая система обеспечивает подачу защитного газа при монтаже кристаллов.

Пятипозиционная револьверная головка предназначена для поочередного захвата пяти кристаллов со столика при ручном совмещении и визуальном наблюдении в микроскоп и поочередного их монтажа в заданной последовательности в корпуса в автоматическом режиме.

Наборное поле служит для задания перестановкой фишек в гнездах необходимых программ монтажа кристаллов.

Более совершенной является установка эвтектической пайки кристаллов на металлические перфорированные ленты, представляющая собой автомат, который находит кондиционный кристалл, с помощью вакуума захватывает его и переносит на позицию пайки, припаяет и возвращается в исходную позицию. Поиск кристалла и пайку можно наблюдать и контролировать на двух дисплеях. Подача ленты на шаг, ее нагрев, вибрация кристалла при пайке и смена лент также происходят в автоматическом режиме. Установка оснащена телевизионно-оптической системой и управляется микропроцессором. Программы сборки полупроводниковых приборов и микросхем различных типов записываются на магнитных дисках.

Установка ЭМ-490 предназначена для присоединения электродных выводов из золотой проволоки к контактным площадкам кристаллов и корпусов микросхем по заданной программе. По координатам, хранящимся в запоминающем устройстве, выводы присоединяют встык оплавленными шариками к контактным площадкам кристаллов и корпусов (установка ЭМ-490Б-1) или встык оплавленным шариком к одной контактной площадке и внахлестку без шарика к другой (установка ЭМ-490А).

В полупроводниковом производстве используется несколько универсальных (пригодных для сборки приборов многих типов) установок ультразвуковой сварки электродных проволочных выводов, отличающихся конструктивным исполнением, но имеющих такие одинаковые устройства, как сварочная головка, ультразвуковой генератор, механизмы давления, подачи и отрезки проволоки, манипулятор, предметный столик.

Сварочная головка представляет собой ультразвуковую колебательную систему, описанную в § 46.

Принцип действия преобразователя ультразвуковых колебаний в механические основан на свойстве некоторых материалов под действием электрического тока изменять свои размеры. Преобразователи ультразвуковых колебаний, называемые иногда электромеханическими излучателями, подразделяют на электродинамические, магнитострикционные и пьезоэлектрические (электрострикционные). Ультразвуковые электродинамические преобразователи по устройству и принципу действия сходны с громкоговорителями (динамиками). В производстве особенно широко применяют магнитострикционные и пьезоэлектрические преобразователи.

Магнитострикционные преобразователи представляют собой замкнутый магнитопровод, набранный из пластин никеля, пермаллоя или пермендюра, на продольные стержни которого намотано по одной обмотке возбуждения и подмагничивания. Применяют их для излучения ультразвуковых колебаний частотой от 5 до 150 кГц.

Пьезоэлектрические преобразователи представляют собой систему, состоящую из кварца, титаната бария или цирконата титана, пьезокерамики и одной или двух металлических пластин, прочно соединенных между собой (склеенных или спаянных), к которым подводится 100 В и более. Применяют их для излучения ультразвуковых колебаний частотой 100 кГц и выше.

Концентратор (волновод), выполненный в виде стержня, поверхность которого обработана по экспоненте или имеет коническую, а иногда цилиндрическую форму, служит для передачи с трансформацией амплитуды (кроме цилиндрического) и с концентрацией (усилением) колебаний. На толстом конце волновода жестко (пайкой) крепится электромеханический излучатель, а на тонком — инструмент для ультразвуковой сварки. Форма волновода существенно влияет на коэффициент концентрации ультразвуковых колебаний. Для изготовления волноводов обычно используют хромистые стали (40Х, 30ХГСА и др.). Крепление колебательной системы должно обеспечивать минимальные потери передаваемой энергии, а также механически прочное и надежное соединение с корпусом установки.

Наилучшим считается жесткое крепление инструмента, например пайкой, но в этом случае затруднена его замена. Передачу ультразвуковых колебаний с малыми потерями обеспечивает также плотная посадка инструмента на конус, но наиболее распространено механическое крепление, при котором инструмент вставляют в специальное отверстие концентратора и надежно затягивают стопорным винтом.

Колебательные системы установок ультразвуковой сварки получают питание от ультразвуковых генераторов, преобразующих ток промышленной частоты в ток высокой (ультразвуковой) частоты. Современные ультразвуковые генераторы на транзисторах монтируются в корпусах установок ультразвуковой сварки и могут быть с независимым возбуждением, с самовозбуждением, с автоподстройкой частоты и с частотной модуляцией.

Рассмотрим ультразвуковой генератор с однократной модуляцией частоты (в течение одного сварочного цикла частота изменяется от ми-

нимума до максимума и, наоборот, однократно). Полосу изменения (прокачки) частоты выбирают так, чтобы перекрыть изменяющуюся собственную частоту преобразователя (обычно 1–1,5 кГц).

Необходимое усилие при сварке автоматически создается механизмом давления, представляющим собой рычажно-грузовое устройство и обеспечивающим нагружение свариваемых деталей от 0,1 до 2,5 Н при перемещении инструмента на расстояние до 1 мм, что не оказывает влияния на точность их совмещения. Для плавного регулирования усилия сжатия соединяемых деталей перемещают грузы по качающимся рычагам.

Микропроволоку, используемую для электродных выводов, подают к месту присоединения различными способами (роликами, струей воздуха, вытягиванием при перемещении инструмента). Наиболее удачен механизм подачи и обрыва микропроволоки с электромагнитами. В момент, когда якорь притягивается к одному из электромагнитов, поворачивается рычаг, связанный с губками, которые сжимают микропроволоку и подают ее в отверстие рабочего инструмента. Обрыв свободного конца происходит при обратном движении губок с зажатой микропроволокой при притягивании якоря другим электромагнитом в противоположном направлении. Микропроволока может также перерезаться ножницами или специальными резаками.

Манипулятор служит для передвижения предметного столика при совмещении микропроволоки и контактной площадки с инструментом. В установках ультразвуковой сварки используются два типа манипуляторов: рычажный и пантографный. Максимально возможное перемещение предметного столика во взаимно перпендикулярных направлениях по горизонтали составляет 15×15 мм при передаточных отношениях рычажного манипулятора от 5:1 до 500:1 и пантографного 12:1 или 360:1. Таким образом, рычажный манипулятор допускает широкий интервал изменения передаточных отношений (регулирование перемещений предметного столика), а пантографный — два фиксированных и управляется электромагнитами.

Предметный столик, предназначенный для размещения и надежного крепления изделия, должен быть жесткой опорой при воздействии вертикальных усилий и в то же время легко поворачиваться на 360°. Иногда предметный столик выполняют плавающим, т.е. легко перемещающимся по горизонтальной плоскости в различных направлениях (на смазке). Предметные столики некоторых установок ультразвуковой сварки имеют подогрев.

Рассмотрим установку ЭМ-4020, предназначенную для присоединения ультразвуковой сваркой внахлестку алюминиевых электродных выводов диаметром от 0,025 до 0,06 мм к покрытым золотом или алюминием контактным площадкам кристаллов и корпусов (металлических лент). Установка работает в автоматическом режиме по заданной программе. В процессе присоединения выводов осуществляется автоматический контроль качества сварки. Если один из выводов по каким-либо причинам оказывается не присоединенным, его порядковый номер отображается на пульте управления. Оператор возвращает корпус на рабочую позицию, где автоматически устраняется обнаруженный дефект.

Эта установка выпускается двух модификаций: ЭМ-4020А и ЭМ-4020М.

В отличие от установки ЭМ-4020 установка ЭМ-4020А имеет оптическую систему, с помощью которой оператор выставляет относительно светового перекрестия по две точки, обычно расположенных по диагонали, в центре контактных площадок ножки и кристалла. При работе установки все электродные выводы автоматически присоединяются по координатам, хранящимся в памяти микропроцессора. Производительность установки — несколько тысяч присоединений в час.

§ 48. Микроконтактная сварка

Микроконтактная сварка — это процесс присоединения проводников толщиной более 20 мкм к тонким металлическим пленкам пропусканием импульса электрического тока через свариваемые материалы с приложением некоторого давления. Микроконтактная сварка аналогична контактной, используемой для герметизации корпусов. Соединение происходит на участках, ограниченных площадью рабочих поверхностей двух электродов, подводящих сварочный импульс и передающих усилие сжатия герметизируемым элементам с разных сторон. Такую сварку называют двусторонней (рис. 108, а). Односторонняя микроконтактная сварка отличается от двусторонней невстречным расположением электродов. Выполняют одностороннюю микроконтактную сварку двумя электродами (рис. 108, б), сдвоенным — расщепленным (рис. 108, в) или строеным (рис. 108, г).

Односторонней сваркой двумя электродами присоединяют тонкие проводники (проволочные или ленточные) к относительно толстым пленкам (более 20 мкм) в местах, доступных для размещения двух электродов. Импульс электрического тока проходит от электродов через слой металлизации. Так как контактное сопротивление привариваемого проводника к металлизированному слою оказывается максимальным под левым электродом, наибольший разогрев металла, а следовательно, и сварка происходит именно в этом месте. Первоначально ток проходит через проволочный проводник (верхнюю деталь), сопротивление которого по мере нагрева увеличивается. При этом наступает момент, когда ток раздвигается

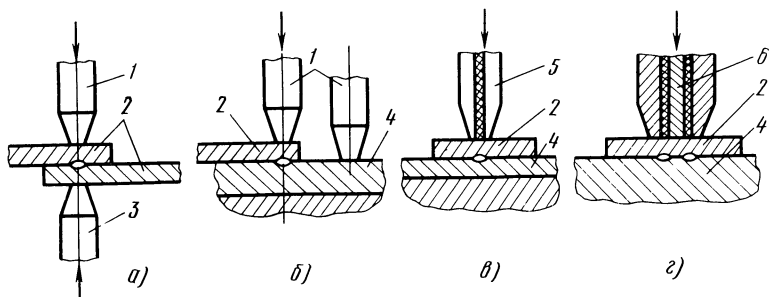


Рис. 108. Схемы микроконтактной сварки:

а — двусторонней, б, в, г — односторонней двумя электродами, сдвоенным (расщепленным) и строеным электродами; 1, 3 — верхний и нижний электроды, 2 — свариваемые детали, 4 — корпус, 5 — сдвоенный электрод, 6 — строенный электрод

и начинает проходить через слой металлизации (нижнюю деталь), что способствует выравниванию температур нагрева деталей.

Односторонней сваркой сдвоенным и строенным электродами присоединяют плоские и проволочные выводы диаметром от 20 до 250 мкм к тонким пленкам в местах, труднодоступных для двух электродов. Зазоры между электродами должны быть в пределах от 10 до 1000 мкм. Так как при микроконтактной сварке электроды устанавливают сверху на привариваемый вывод и прижимают к пленке (металлизации) контактной площадки, электрический ток, проходя в основном через вывод, разогревает его, и сварка происходит под электродами или в зазоре в зависимости от контактного сопротивления.

При микроконтактной сварке строенным электродом нагрев осуществляется трехфазным током, что создает более равномерное прогревание свариваемых деталей, требуется меньшая мощность сварочного импульса и не происходит перегрев проводника в межэлектродных зазорах.

Несмотря на очевидные достоинства сварки строенным электродом, преимущественно используются установки со сдвоенным (расщепленным) электродом, как не требующие увеличения размеров контактных площадок и обеспечивающие присоединение электродных выводов сшиванием, т.е. последовательным выполнением первой и второй сварки (присоединение вывода сначала к контактной площадке кристалла, а затем к выводу корпуса). Иногда такое последовательное присоединение электродных выводов называют петлевым.

Микроконтактной сваркой соединяют проволочные выводы из золота, серебра, меди с контактными площадками, покрытыми золотом, медью, никелем, алюминием, серебром, танталом (первая сварка), а также с выводами корпуса (подложкой), покрытыми этими же металлами (вторая сварка). Эту сварку применяют также для соединения отдельных полей металлизации перед нанесением гальванических покрытий и в других случаях.

Микроконтактную электросварку иногда разделяют на два вида: плавлением и сопротивлением. При сварке плавлением оба соединяемых металла разогреваются до температуры плавления и при охлаждении в сварной точке образуется ядро литой структуры. К этому виду сварки относится двусторонняя микроконтактная сварка. При сварке сопротивлением до температуры пластического состояния быстрее разогревается вывод. В момент приложения усилия сжатия происходит его пластическое деформирование и взаимное схватывание атомов свариваемых металлов с образованием прочного соединения. Первое соединение характерно для двусторонней микроконтактной сварки, а второе — для односторонней.

Микроконтактная сварка обеспечивает надежное присоединение электродных выводов широкого диапазона размеров и из различных материалов к тонким металлическим пленкам. Наряду с достоинствами она имеет недостатки. Так, из-за неправильно подобранного режима возможны поломки полупроводниковых кристаллов (образование трещин), ухудшение электрических параметров электронно-дырочных переходов, значительная деформация электродных выводов в месте присоединения.

Максимальную прочность присоединения электродных выводов микро-

контактной сваркой получают оптимальным подбором формы сварочного импульса по длительности нарастания напряжения и тока, а также усилия сжатия свариваемых деталей. Кроме того, соединяемые детали и инструмент должны быть подготовлены к сварке согласно принятому технологическому процессу.

§ 49. Пайка электродных выводов

Пайкой присоединяют электродные выводы мощных полупроводниковых приборов — транзисторов выпрямительных, туннельных и СВЧ-диодов, а также модулей. Пайка электродных выводов к контактными площадкам кристаллов (плат) и выводам ножек (корпусов) должна обеспечивать:

- высокую прочность соединения;
- минимальные электрическое сопротивление и площадь контакта (не более $0,05\text{--}0,1\text{ мм}^2$ для выводов диаметром 100 мкм);
- незначительное изменение физико-механических свойств материалов в месте их контакта в течение длительного времени;
- отсутствие коротких замыканий и загрязнений;
- минимальные температуру нагрева, давление и время выдержки.

Для выполнения этих требований пайку выполняют низкотемпературными (мягкими) припоями на основе олова, свинца и индия в термических установках (печах) непрерывного и периодического действия в атмосфере защитного газа и на воздухе. Кроме того, можно производить пайку нагревом электрическим током (прямым и косвенным) или паяльником (электрическим, газовым). Перед пайкой детали тщательно очищают.

Для пайки в термических установках детали, фиксируя в нужном положении относительно друг друга, в определенной последовательности укладывают в кассеты. Припой в виде деталей определенных форм и размеров закладывают между соединяемыми деталями. Иногда припой предварительно осаждают гальваническим способом на концы плоских выводов или электрохимическим способом в виде шарика — на концы проволоочных. Кассеты изготовляют из термостойких материалов, не смачиваемых или плохо смачиваемых расплавленным припоем.

Как правило, при пайке выводов в термических установках роль флюса выполняет водород (или его смесь с азотом — формиргаз), восстанавливающий оксиды на поверхностях соединяемых деталей и припое, а также предохраняющий их от окисления. Процесс присоединения электродных выводов состоит из нескольких этапов: нагрева деталей до максимальной температуры пайки, выдержки при этой температуре и охлаждения с определенной скоростью до $50\text{--}100^\circ\text{C}/\text{мин}$. Охлаждаться спаянные детали могут вместе с печью (как это делается в термических установках периодического действия, например колпаковых) и в специальных холодильниках, являющихся продолжением печи непрерывного действия (конвейерных термических установок). Возможна также пайка электродных выводов в вакуумных печах, но ее применяют редко, так как вакуумная пайка — довольно низкопроизводительный процесс.

При пайке электродных выводов электрическим нагревом импульс

тока можно пропускать непосредственно через соединяемые детали или использовать дополнительный контакт, если есть место для ввода электрода. Иногда места соединения нагревают спиралью, через которую пропускают импульс тока.

Пайка электродных выводов специальным электрическим паяльником с миниатюрным наконечником наиболее рациональной формы заточки требует применения флюса, который после получения соединения должен быть удален. Пайка газовым паяльником по сравнению с электрической имеет некоторые преимущества: процесс происходит в атмосфере защитного газа. После расплавления припоя его кристаллизация может быть ускорена обдувом места соединения газом комнатной температуры или специально охлажденным.

Для пайки электродных выводов имеется множество различных высокопроизводительных полуавтоматических и автоматических установок, разработанных с учетом специфики технологического процесса изготовления конкретных изделий.

При пайке электродных выводов возможно образование таких дефектов, как смещение вывода относительно контактной площадки кристалла (платы), недостаточное растекание припоя и заполнение им зазоров (непропай), образование трещин в кристаллах и закороток различных областей электронно-дырочных переходов или соседних контактных площадок (токопроводящих дорожек).

Контрольные вопросы

1. Какие методы монтажа кристаллов на ножки вы знаете?
2. Какие требования предъявляют к монтажу кристаллов?
3. В чем сущность контактно-реактивной пайки и пайки эвтектическими сплавами?
4. Какие методы присоединения электродных выводов к контактным площадкам кристаллов и корпусов вы знаете и каковы их достоинства и недостатки?
5. Что такое термокомпрессия?
6. Каков принцип ультразвуковой сварки?
7. Каково устройство и принцип действия установки для монтажа кристаллов в корпуса?
8. Каково устройство и принцип действия оборудования для термокомпрессионной и ультразвуковой сварки электродных выводов?
9. Каков принцип микроконтактной сварки?
10. Какие требования предъявляют к пайке электродных выводов?

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ. КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

§ 50. Общие сведения

Под герметичностью понимают способность замкнутой конструкции не пропускать газ (жидкость). Абсолютно непроницаемых конструкций не существует, поэтому герметичность характеризуется допустимой утечкой (течью) газа (жидкости), измеряемой в единицах потока. Поток газа или жидкости через микротоверстия выражают единицей объема при определенном давлении за определенное время и измеряют в л·мкм рт. ст/с.

В Международной системе единиц (СИ) поток измеряют в $\text{м}^3 \cdot \text{Па/с}$; $1,32 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с} = 1 \text{ л-мкм рт. ст/с}$.

Корпуса полупроводниковых приборов считаются герметичными при натекании гелия не более $1,32 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Герметизация является одной из важнейших заключительных операций технологического процесса производства полупроводниковых приборов и микросхем, так как обеспечивает их надежную и долговечную работу при механических и климатических воздействиях в условиях эксплуатации. Кроме того, герметизация является последней операцией сборки полупроводниковых приборов и микросхем и от ее качества зависит выход годных изделий.

Подсчитано, что трудоемкость сборочных операций (вместе с герметизацией) некоторых массовых изделий микроэлектроники (транзисторов и микросхем) превышает трудоемкость всех других операций. Забракованные негерметичные приборы представляют собой довольно дорогие и почти готовые изделия, что заставляет с особой тщательностью относиться к процессам герметизации.

Постоянное стремление к повышению компактности, миниатюризации и быстродействия электронных систем вызывает увеличение плотности рассеиваемой мощности (особенно в микросхемах), что усложняет теплоотвод от активных элементов, налагая дополнительные требования к конструкции корпусов и способам их герметизации. В настоящее время установлено, что герметизация и конструктивное исполнение корпусов являются не менее сложной проблемой, чем создание электронно-дырочных переходов. Исследования показали, что проникновение в процессе эксплуатации в корпус транзистора такого ничтожного количества влаги, как 0,0005%, может вызвать нестабильность его параметров.

Такие способы герметизации корпусов полупроводниковых приборов, как заливка пластмассой, склеивание специальными клеями, стеклоцементами, глазуриями и лаками, заварка стеклом, а также различные виды сварки и пайки, имеют свои достоинства и недостатки. Герметизация пластмассой, например, пригодна для массового производства изделий микроэлектроники широкого применения. Приборы в пластмассовой оболочке характеризуются низкой стоимостью, хорошим внешним видом, групповой технологией производства. Но пластмассовая герметизация не обеспечивает требуемой герметичности при испытаниях на климатические воздействия и в условиях эксплуатации. Некоторые корпуса герметизируют, приклеивая керамическую крышку к металлокерамической ножке. Такая герметизация надежна, не требует дорогостоящего оборудования, но процессы нанесения и отверждения клея довольно длительны.

Герметизацию стеклоцементами, глазуриями, лаками и стеклом применяют ограниченно. Рассмотрим подробно герметизацию корпусов сваркой и пайкой.

§ 51. Герметизация корпусов контактной контурной электросваркой

Широкое внедрение в производство контактной контурной электро-сварки стало возможным в связи с созданием промышленного сварочного

оборудования и разработкой новых конструкций корпусов, пригодных для герметизации этим способом.

В качестве аккумулирующей системы в установках контактной контурной электросварки обычно используется батарея электролитических конденсаторов. Электрическая энергия накапливается при заряде конденсаторов от источника постоянного напряжения (выпрямителя), а затем расходуется при их разряде, превращаясь в процессе сварки в тепловую энергию.

Достоинствами этого вида сварки являются: постоянный расход электроэнергии, что обеспечивает высокую воспроизводимость результатов; кратковременность и концентрированное тепловыделение в месте соединения, обеспечивающее минимальную зону нагрева свариваемых металлов, непосредственно окружающую сварной шов; возможность качественного соединения разнородных металлов и сплавов, плохо свариваемых или совсем не свариваемых другими способами. Кроме того, конденсаторная сварка способствует выравниванию фазовой нагрузки и повышению коэффициента мощности питающей электросети, а также не требует сварщиков высокой квалификации.

Основными элементами установки контактной контурной электросварки (рис. 109) являются выпрямитель B , преобразующий переменный ток в постоянный, батарея конденсаторов C для накопления (аккумулирования) электроэнергии и переключатель Π для последовательного соединения батареи конденсаторов с источником питания (выпрямителем) и сварочным трансформатором Tp , предназначенным для получения в сварочной цепи больших токов при низком напряжении и различных форм кривых сварочного тока при изменении коэффициента трансформации.

Накопленную в батарее конденсаторов энергию (Вт·с) определяют по формуле $W = C U^2 \cdot 10^{-6}/2$, где C — рабочая емкость батареи конденсаторов, мФ; U — напряжение заряда конденсаторов, В. Таким образом, накопленную в конденсаторах энергию можно регулировать, изменяя их емкость, напряжение заряда или одновременно оба параметра.

При контактной сварке соединяемые детали нагреваются теплотой, выделяющейся при прохождении через них сварочного тока. Известно два метода нагрева соединений при контактной электросварке: сопротивлением, а также сопротивлением и оплавлением.

Метод сопротивления характеризуется хорошим контактом свариваемых деталей. При прохождении сварочного тока через контактируемые поверхности выделяется количество теплоты, пропорциональное квадрату плотности тока, времени его протекания и удельному сопротивлению металла.

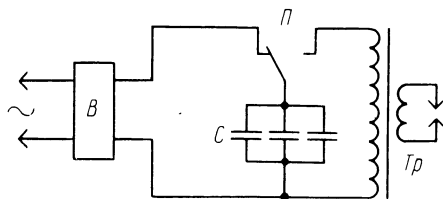


Рис. 109. Электрическая схема установки контактной контурной электросварки

Метод сопротивления и оплавления отличается от метода сопротивления тем, что свариваемые детали лишь соприкасаются. Это увеличивает сопротивление контакта и сварочный ток, который быстро их нагревает. При соединении металлических деталей контактной электросваркой получают сварной шов в виде общего литого ядра или без ядра в зависимости от нагрева соответственно методом сопротивления либо сопротивления и оплавления.

Для герметизации корпусов в основном используется контактная электросварка с нагревом сопротивлением. Рассмотрим ее.

Корпуса полупроводниковых приборов и микросхем герметизируют сваркой по замкнутому контуру, которую в отличие от других видов сварки (точечной, роликовой, стыковой) называют контактной контурной сваркой (ККС), а в случае применения рельефов — контактной контурно-рельефной сваркой (ККРС), или электросваркой.

При определении количества теплоты, необходимой для сварки, учитывают неизбежные тепловые потери на нагрев контактного участка электрод — деталь. Контактное сопротивление электрод — деталь должно быть минимальным (намного меньше контактного сопротивления между свариваемыми деталями), а контактное сопротивление между свариваемыми деталями — значительным, особенно если они изготовлены из материалов, имеющих низкое удельное электрическое сопротивление. Контактное сопротивление зависит от состояния поверхностей свариваемых деталей и удельного давления, создаваемого сварочными электродами.

Для получения надежной герметизации контактное сопротивление между свариваемыми деталями специально увеличивают, особенно при низком удельном сопротивлении материалов и необходимости использовать мало-мощную сварочную машину для герметизации значительных по размеру корпусов, т.е. при большой протяженности сварного контура. Увеличивают контактное сопротивление, выполняя на ножке и баллоне узкие сварочные контуры — сварочные пояски или рельефы.

Сварочные пояски (рис. 110, а) обычно используют в корпусах мало-мощных полупроводниковых приборов, ножки и баллоны которых, как правило, изготовляют из материалов, имеющих большое удельное электрическое сопротивление (ковар — ковар, ковар — никель, ковар — сталь).

Сварочные рельефы (рис. 110, б, в) выполняют на корпусах мощных

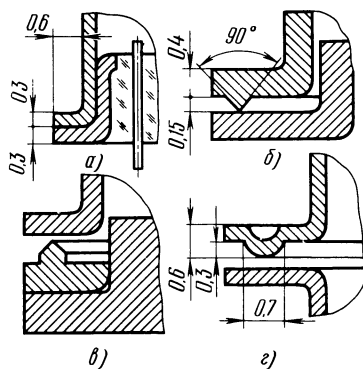


Рис. 110. Способы увеличения контактного сопротивления между ножкой и баллоном выпоннением:

а — узких сварочных поясков,
б, в — сварочных рельефов,
г — гофра

полупроводниковых приборов с большой протяженностью контура сварки, баллон и ножку (фланец) которых соответственно изготавливают из ковара (никеля) и меди. Медь, обладая малым удельным электрическим сопротивлением, не обеспечивает с коваром необходимого контактного сопротивления, а следовательно, при сварке не выделяется требуемое для плавления количество теплоты. Поэтому между медным фланцем ножки и баллоном для повышения контактного сопротивления помещают промежуточную деталь — обычно никелевое или коваровое кольцо, что удорожает корпус. Рельеф может быть выполнен на промежуточном кольце, но лучше его делать на баллоне, а кольцо оставлять гладким. Сварочные рельефы с минимальным радиусом вершины обычно получают чеканкой. Повысить контактное сопротивление можно также, выполняя гофр (рис. 110, з).

В последнее время для медных деталей подобран рельеф оптимальной формы и размеров, позволяющих отказаться от промежуточного кольца и тем самым упростить и удешевить корпуса мощных полупроводниковых приборов. Конструктивные элементы корпусов мощных транзисторов с промежуточным кольцом и без него показаны на рис. 111, а, б. В первом случае рельеф 5 выполнен на промежуточном кольце 4, а во втором — непосредственно на медном фланце 3. Контактное сопротивление можно также увеличить, выполнив на баллоне наклонный фланец, которым он будет касаться фланца ножки частью (рис. 112, а) или торцом (рис. 112, б).

При контактной контурно-рельефной сварке рельеф и соприкасающийся с ним металл в зоне максимального сопротивления сильно нагреваются и в

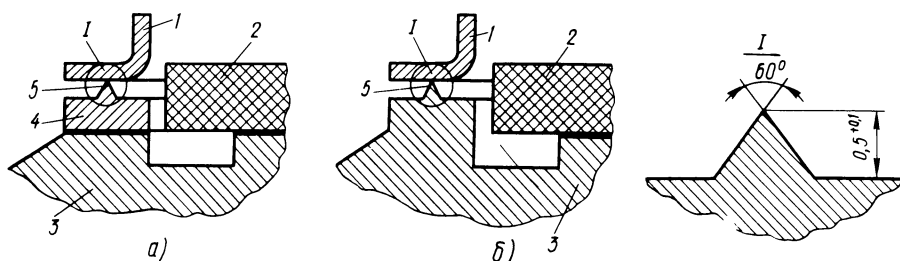


Рис. 111. Конструктивные элементы корпусов мощных транзисторов, герметизируемых контурной контактной электросваркой:

а — с промежуточным кольцом, б — без него; 1 — баллон, 2 — керамический изолятор, 3 — фланец, 4 — промежуточное кольцо, 5 — рельеф

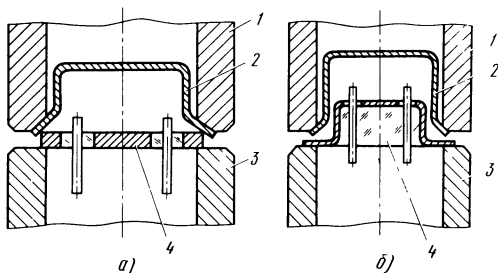


Рис. 112. Способы увеличения контактного сопротивления касанием фланца ножки наклонным фланцем баллона (а) или его торцом (б):

1, 3 — верхний и нижний электроды, 2 — баллон, 4 — ножка

результате расплавляются. Когда место соприкосновения свариваемых деталей нагревается до определенной температуры, начинает плавиться вся зона будущего шва. Очень важно, чтобы нагрев обеих свариваемых деталей был равномерным и одинаковым. Для этого рельеф следует выполнять на детали с лучшим теплоотводом или изготовленной из материала, обладающего большей теплопроводностью и малым сопротивлением электрическому току. Свариваемые детали сжимают, но с усилием, которое бы не деформировало рельеф, который, постепенно расплавляясь под действием усилия сжатия, расплющивается.

Надежное сварное соединение получают лишь при условии одновременного расплавления обеих свариваемых поверхностей деталей. В этот период под действием усилия сжатия расплавленный металл образует общее ядро, которое удерживается более холодным материалом, находящимся в околосшовной зоне. На жидкий металл действуют динамическая сила тока, собственное расширение, расширение паров и другие силы, способствующие выплеску металла из ядра. При большом выплеске в ядре остается мало расплавленного металла, сварное соединение будет негерметичным и иметь плохой внешний вид.

Основными параметрами контактной контурной сварки, выполняемой на конденсаторных машинах, являются: емкость батареи конденсаторов и напряжение ее заряда; усилие сжатия свариваемых деталей и коэффициент трансформации. Перед сваркой детали химически покрывают слоем никеля толщиной 3–5 мкм. Химическое никелирование корпусов с точки зрения получения надежного сварного соединения предпочтительнее гальванического. Испытания загерметизированных корпусов на механическую прочность (разрыв) показали их высокую надежность. Среднее усилие разрыва корпуса по месту сварки составило 200 МН/м^2 .

Наиболее серьезным недостатком контактной электросварки являются выплески металла. При разогреве свариваемых металлических деталей электрическим током образуются объемные электродинамические силы, стремящиеся вытолкнуть расплавленный металл за пределы сварочного контура. В результате действия этих сил появляются выплески расплавленного металла, которые, кристаллизуясь по периферии корпуса, не только ухудшают внешний вид прибора, но и являются одной из причин их негерметичности. На появление выплесков металла при сварке оказывают также влияние усилие сжатия сварочного инструмента — электродов (удельное давление электродов) и длительность времени прохождения сварочного импульса. Эти параметры обычно подбирают опытным путем для каждой конкретной конструкции корпуса и сварочного инструмента, и они должны быть оптимальными.

Кроме того, причиной выплесков металла может быть слишком большая емкость батареи конденсаторов. При сварке обычно используют полную емкость батареи, чтобы в процессе эксплуатации сварочной установки не выполнять электроформовку конденсаторов. В этом случае емкость конденсаторов считают постоянной, а режим сварки подбирают, изменяя остальные параметры. Загрязнения на поверхностях свариваемых деталей и непараллельность рабочих кромок электродов увеличивают контактное сопротивле-

ние сварочному току и зону расплавленного металла, что также является причиной появления выплесков.

Так как соединяемые ножки и баллоны имеют малые размеры сварочных поясков, электроды должны иметь точную центровку и обеспечивать точную центровку соединяемых деталей, исключающую взаимные перекосы и смещения контактируемых поверхностей (электрод — деталь и деталь — деталь) .

Наиболее целесообразен сварочный инструмент, показанный на рис. 113. Державки 1 и 5 электродов со вставками 3 центрируются запрессованными в текстолитовый стакан 6 стальными шлифованными втулками 2, разделенными изоляционной втулкой 4. Изготавливают электроды из меди (М2 или М3) , так как она обладает высокой электро- и теплопроводностью. Вставки 3, служащие для увеличения срока службы электродов, должны кроме хорошей электро- и теплопроводности обладать высокой механической прочностью при сжатии.

Таким материалом является эльконайт — псевдосплав, состоящий из 70—80 % вольфрама и 30—20 % меди и получаемый методом порошковой металлургии. Вставки из эльконайта, имеющие твердость $HV_{2,6} = 2,9 \text{ кН/мм}^2$, впаивают припоем ПСр45 в медные державки (электроды) . Стойкость электродов из лучших партий эльконайта при герметизации корпусов мало-мощных транзисторов в среднем соответственно составляет 2500 и 1800 сварок. Основным показателем выхода из строя электродов является выработка или выкрашивание их рабочего пояска. Восстанавливают электроды, шлифуя и притирая их рабочую поверхность до удаления выработанной области, а затем, если необходимо, развертывают внутреннее отверстие.

Кроме эльконайта электродным материалом может служить специальная бронза БрНБТ, представляющая собой сплав меди с 1,4—1,6% никеля, 0,2—0,4 % бериллия и 0,05—0,15 % титана. После термообработки (закаливания и отпуска) бронза приобретает свойства, необходимые электродным материалам, превосходя эльконайт по электро- и теплопроводности и лишь незначительно уступая ему в твердости.

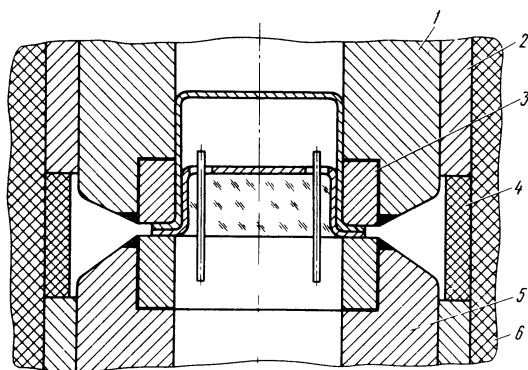


Рис. 113. Сварочный инструмент для герметизации корпусов контактной контурной электросваркой: 1, 5 — державки электродов, 2, 4 — стальная и изолирующая втулки, 3 — вставки, 6 — текстолитовый стакан

В отдельных случаях для компенсации неплоскостности рабочих частей сварочного оборудования и свариваемых деталей, а также устранения перекоса сварочного инструмента верхний электрод выполняют со сферической головкой, которая, соприкасаясь с ответной сферой промежуточной детали, позволяет ему самоустанавливаться.

Свойства некоторых материалов, применяемых для изготовления электродов, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Свойства материалов для изготовления электродов

Материал	Твердость по Бринеллю, кН/мм ² ,	Электропроводность, % от меди	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Температура разупрочнения, °С
Медь М1, М2, М3	0,75—1	100	390	150—200
твердотяннутая				
Эльконайт	2,6—2,9	35—40	276	600—700
Бронза БрНБТ	1,7—2,4	50—55	240	500—550
Бронза БрХБ	1,1—1,3	85	234	350—400

Для получения стабильно высоких результатов при герметизации корпусов желательно, чтобы свариваемые детали были из однородных металлов и равной толщины. В этом случае получаемое при сварке литое ядро имеет постоянные размеры и расположено симметрично, что обеспечивает стабильную механическую прочность соединения. Между тем ножки и баллоны, особенно мощных полупроводниковых приборов, как правило, изготовлены из неоднородных металлов и имеют разную толщину.

При сварке однородных металлов разной толщины ядро смещается в деталь большей толщины, а при сварке разнородных металлов равной толщины — в деталь с наименьшей электро- и теплопроводностью. Кроме того, при сварке на конденсаторных машинах разнородных металлов неодинаковой толщины ядро может изменять свое положение и размеры в зависимости от направления сварочного тока.

Для максимального использования теплоты, выделяющейся в контакте твердой и жидкой фаз разнородных металлов, необходимо деталь из материала, обладающего более низкой электро- и теплопроводностью, располагать со стороны электрода, соединенного с отрицательным полюсом источника сварочного тока.

Таким образом, герметизация корпусов полупроводниковых приборов контактной контурной электросваркой имеет свою специфику: выполняется с использованием узких сварочных поясков или рельефов; должна происходить без выплесков металла и прожогов; сварной шов должен иметь хороший внешний вид.

Обычно сваривают детали из разнородных материалов и неравной толщины. Основными свариваемыми материалами являются ковар—ковар, ковар — никель, ковар — сталь 10, никель — никель, медь — никель, медь — ковар, имеющие гальванические покрытия никеля и золота по подслою никеля. Полученные соединения должны быть герметичными, механически прочными в широком диапазоне частот и ускорений и работоспособными в различных климатических условиях.

§ 52. Герметизация корпусов лазерной сваркой

Такие широко распространенные методы герметизации корпусов, как контурная контактная электросварка и пайка, непригодны для герметизации корпусов модулей, а также некоторых микросхем из-за значительной длины их контура (отсутствие специального оборудования), невозможности соединения пар металлов титан — титан, ковар — титан и специфических особенностей конструкции (невозможность приложения значительных нагрузок, недопустимость перегрева элементов).

Для герметизации этих корпусов применяют лазерную сварку. Лазерной сваркой можно герметизировать также маломощные диоды и транзисторы, если отказаться от традиционных для них металлостеклянных корпусов и перейти на бесфланцевые конструкции (по аналогии с корпусами фоторезисторов, фотодиодов и фототранзисторов. Это позволило бы уменьшить их габариты и упростить технологию изготовления металлических деталей. Достоинствами лазерной сварки являются:

- возможность соединения разнородных, разнотолщинных и тугоплавких (вольфрам, молибден) материалов, а также металлов, обладающих большой теплопроводностью (медь, серебро);

- слабый нагрев близко расположенных от места сварки участков;

- отсутствие деформации соединенных деталей;

- возможность выполнения в труднодоступных местах, в замкнутых объемах, в любой среде, а также передачи излучения через прозрачный материал (сапфир) непосредственно к месту соединения.

Недостатки лазерной сварки — незначительная глубина проплавления соединяемых металлов при средних мощностях излучения, выплески испаряемого металла при использовании мощных (выше 8 кВт) лазеров и необходимость удаления образующихся ядовитых газов и ионизированных паров свариваемых металлов. Кроме того, при сварке металлов, обладающих высокими коэффициентами отражения, происходят значительные потери энергии лазера.

При воздействии на поверхность свариваемых металлов лазерного излучения некоторая часть его отражается. Коэффициент отражения всех металлов с увеличением длины волны лазерного излучения увеличивается. Так, коэффициент отражения никеля равен 0,68, 0,75 и 0,95 соответственно для лазерного излучения с длиной волны 0,7, 1,06 и 10,6 мкм. Поглощающая способность металлов также не постоянна и при повышении температуры увеличивается.

Уменьшают отражательную способность свариваемых металлов, увеличивая шероховатость мест сварки, покрывая эти места пленками, имеющими низкий коэффициент отражения, или подбирая оптимальные формы и размеры кромок соединяемых деталей.

Для уменьшения потерь лазерного излучения при сварке металлов, обладающих большой теплопроводностью, делают сварочные кромки тонкими (до 0,5 мм), а для снижения отражательной способности выполняют резанием, отбортовкой или штамповкой металлических деталей специальные светоловушки — треугольные щели.

Режим лазерной сварки в зависимости от свойств, толщины и формы сварочных кромок, состояния поверхностей и других параметров каждой пары свариваемых металлов подбирают опытным путем. Прочность сварного соединения определяется затраченной на нагрев энергией, временем действия лазерного излучения и диаметром лазерного (светового) пятна, сфокусированного на поверхности соединяемых деталей, независимо от особенностей материалов, из которых они изготовлены.

Скорость сварки зависит от мощности применяемого лазера. Что же касается прочности сварного соединения, то при увеличении энергии лазера она сначала растет (увеличивается сечение литой зоны — глубина и диаметр), а затем уменьшается, так как происходит интенсивное испарение металла, при котором площадь сечения литой зоны уменьшается, а следовательно, снижается и прочность.

Увеличение длительности сварочного импульса способствует более полному удалению нерастворенных газов, снижает пористость сварного шва. Диаметр сфокусированного светового пятна должен быть оптимальным, так как им определяется площадь сечения литой зоны шва.

Из отечественного лазерного оборудования, применяемого для герметизации корпусов, заслуживают внимания установки "Квант-12" и "Квант-17" на твердотельных лазерах, выполненных на алюмоиттриевом гранате с неодимом. Применение твердотельных лазеров для сварки обусловлено высокой частотой повторения импульсов, коротковолновым излучением и хорошей разрешающей способностью.

Однолучевая установка "Квант-12" служит для герметизации точечной сваркой любых металлических корпусов с толщиной стенок 0,5—1 мм. Так, герметизацию металлостеклянных прямоугольных корпусов микросхем, состоящих из коваровой ножки и никелевой крышки толщиной 0,6 мм, свариваемых встык в атмосфере инертного газа, выполняют на установке "Квант-12" в следующем режиме:

Мощность излучения, Вт	30
Энергия импульса, Дж	3
Частота повторения импульсов, Гц	10
Диаметр лазерного луча на поверхности свариваемых кромок, мм	0,7
Коэффициент перекрытия отдельных сварных точек	0,64
Скорость сварки, мм/мин	150
Глубина проплавления, мм	0,3

Температура нагрева корпуса вокруг стеклянных изоляторов составляет 65—95°С.

Полуавтоматическая двухлучевая установка "Квант-17" (рис. 114) предназначена для одновременной герметизации сваркой двух сторон корпусов микросхем, имеющих размеры от 10 до 40 мм. Для этого в установке имеется два активных элемента 7, которые расположены соосно и помещены в отдельные камеры с импульсными лампами накачки 6, подключенными к общему источнику питания 8 последовательно, чтобы обеспечивалось одинаковое излучение. Резонатор состоит из двух сферических зеркал 5. С помощью призм 4 полного внутреннего отражения и объективов 3 лазерные лучи направляются на сварочные кромки корпуса микросхемы с двух сторон и фокусируются на них.

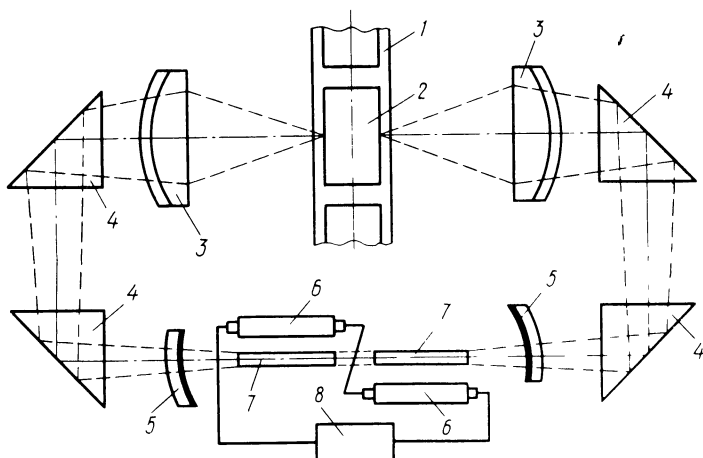


Рис. 114. Схема полуавтоматической двухлучевой лазерной установки для герметизации корпусов микросхем:

1 — кассета, 2 — корпус, 3 — объектив, 4 — призма полного отражения, 5 — сферическое зеркало, 6 — лампа накачки, 7 — активный элемент, 8 — источник питания

Установка "Квант-17" имеет многоступенчатую кассету 1 для укладки корпусов герметизируемых микросхем 2, которая автоматически с заданной скоростью перемещается и поворачивается на 90° для герметизации двух других сторон корпусов. При размерах сторон прямоугольных корпусов микросхем $28,5 \times 38,5$ мм производительность установки 120 корпусов в час.

§ 53. Герметизация корпусов электронно-лучевой сваркой

Отличием электронно-лучевой сварки от других видов сварки является механизм теплопередачи. При обычных видах сварки нагрев свариваемых металлов происходит теплопередачей через их поверхность, а при электронно-лучевой тепловая энергия высвобождается при торможении электронов в поверхностных слоях твердого тела. Проплавление соединяемых материалов зависит от глубины, в которой происходит полная потеря энергии электронов при многочисленных их соударениях с атомами и электронами кристаллической решетки. Глубина проплавления определяется плотностью соединяемых материалов и ускоряющим напряжением, воздействующим на электроны. При определенных условиях сварки проникновение электронов в металл составляет несколько десятков микрон.

Пучком электронов управляют при сварке с помощью электрических и магнитных полей. Если необходимо, ускоряют электроны, увеличивая их кинетическую энергию, изменяют направление электронного пучка или фокусируют его в фокальной плоскости в пятно нужных размеров. Фокусировка электронного пучка до $0,005-0,1$ мм обеспечивает концентрацию на обрабатываемых поверхностях очень большой мощности (10^9 Вт/см² и более) и их локальный нагрев. Такой теплотой можно расплавить любой из известных материалов.

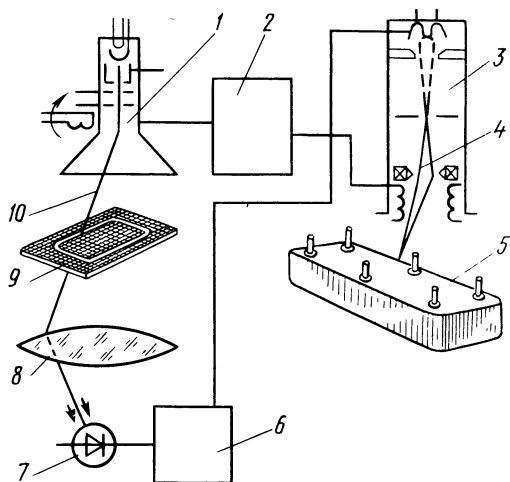


Рис. 115. Схема электронно-лучевой установки герметизации корпусов с программным перемещением электронного луча:

1 — электронно-лучевая трубка, 2 — блок питания отклоняющих систем, 3 — электронная пушка, 4 — пучок электронов, 5 — изделие, 6 — источник и усилитель, 7 — фотоэлемент, 8 — линза, 9 — маска, 10 — пучок света

Для герметизации корпусов микросхем и модулей электронно-лучевой сваркой в вакууме используют установку, которая была показана на рис. 64. Возможна также электронно-лучевая сварка на воздухе или в атмосфере инертных газов, но при этом очень усложняется конструкция установки (особенно устройство вывода электронного луча из вакуумной камеры в атмосферу), поэтому применять ее нецелесообразно.

Электронно-лучевая сварка выгодна отличается, например, от пайки тем, что электронный пучок действует почти мгновенно, поэтому вся микросхема не нагревается. При сварке необходимо, чтобы электронный пучок перемещался относительно герметизируемого корпуса или, наоборот, корпус — относительно пучка с заданной скоростью и по определенной траектории. Установка, в которой электронный пучок неподвижен, а перемещается столик с изделиями, была показана на рис. 64.

Выпускаются также установки, в которых электронный пучок перемещается относительно изделия по заданным программам. Довольно широко применяют систему программирования перемещения электронного луча с использованием маски (шаблона) (рис. 115). При работе установки в момент освещения фотоэлементом 7 пучком света 10 электронно-лучевой трубки 1, прошедшим через маску 9, открывается прожектор — эмиссионная система, ускоряющая и формирующая пучок электронов 4 электронной пушки 3, и осуществляется сварка. Пучок электронов 4 электронной пушки и пучок света 10 электронно-лучевой трубки автоматически синхронно управляются двумя блоками: питания отклоняющих систем 2, обеспечивающего синхронную развертку обоих пучков, а также усилителя и источника 6 записи электронного пучка пушки. Отверстия в маске должны соответствовать конфигурации сварочного шва.

Достоинствами электронно-лучевой сварки являются: возможность соединения очень тонких материалов, имеющих толщину несколько микрометров; высокая чистота процесса, так как он выполняется в вакууме; точная фокусировка и дозирование энергии электронного пучка, обеспечивающие выделение большой мощности, что позволяет соединять тугоплавкие, высокопрочные и химически активные металлы и сплавы при значительных скоростях (10–100 м/ч).

§ 54. Герметизация корпусов микроплазменной сваркой

Корпуса полупроводниковых приборов, а также микросхем можно герметизировать обладающей большим запасом тепловой энергии плазменной струей — потоком ионизированных частиц, максимальная температура которого может достигать более 20 000 К. Обычно корпуса герметизируют, используя довольно слабый источник плазмы, так называемую микроплазму. Ионизированный поток создают с помощью дугового разряда, возбуждаемого между двумя электродами, через которые под давлением подают инертный газ (обычно аргон). Проходящий через межэлектродное пространство газ ионизируется и приобретает большой запас тепловой энергии, которая используется для нагрева и сварки деталей. Промышленные установки микроплазменной сварки имеют специальные горелки, по внешнему виду напоминающие горелки, предназначенные для газовой сварки или резки. С помощью плазмы можно сваривать не только металлы, но и неметаллы и их сочетания.

Ионизация аргона (создание аргоновой плазмы) в плазменной горелке (рис. 116) происходит в определенной последовательности. Вначале при подаче питания от источника ИП между подвижным 1 и неподвижным 3 электродами возбуждается дуговой разряд. Затем в канал 2 под давлением подается аргон, который, проходя через столб дуги, ионизируется и в виде струи плазмы 6 выбрасывается из сопла 5 горелки. Для концентрации струи ионизированного аргона неподвижный электрод 3 и столб дуги охлаждают водой. В результате резкого повышения температуры (до 10 000–15 000 К) струя 6 плазмы (ионизированного аргона), выходящая из сопла 5, приобретает большой запас тепловой энергии, используемой для нагрева и сварки деталей.

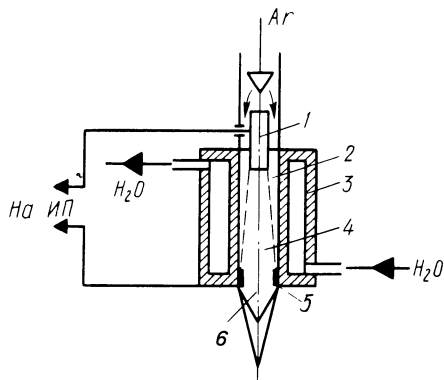


Рис. 116. Плазменная горелка:

1, 3 — подвижный и неподвижный электроды, 2 — канал, 4, 6 — столб и струя плазмы, 5 — сопло горелки

Напряжение дуги и мощность плазменной струи регулируют, перемещая электрод 1 в канале 2. Кроме того, эффективную тепловую мощность плазменной струи можно регулировать, изменяя ток и напряжение дуги, расход и состав газа, диаметры канала и сопла, а также расстояние между соплом и свариваемыми деталями. Температура плазменной струи зависит от плотности энергии в столбе дуги, на которую существенно влияет степень обжатия столба плазмы 4 газовым потоком в узком сопле плазменной горелки.

Микроплазменная герметизация требует интенсивного отвода теплоты от свариваемых деталей.

§ 55. Контроль герметичности корпусов

Герметичность корпусов является важнейшей характеристикой надежности и долговечной работы полупроводниковых приборов и микросхем при различных условиях их эксплуатации. Чтобы убедиться, что корпуса действительно обладают требуемой герметичностью, их подвергают контролю. Применяемые методы и средства контроля герметичности корпусов можно разделить на три группы.

К первой группе относятся компрессионно-термический (масляный), компрессионный, а также вакуумно-жидкостный методы, при которых утечка газа (жидкости) через неплотности или микроотверстия определяют созданием в контролируемом объеме корпуса давления выше атмосферного. Компрессионно-термический метод основан на повышении давления газа в замкнутом объеме корпуса, погруженного в нагретое масло, и регистрации пузырьков газа, выходящих через неплотности в нем. При компрессионном методе также регистрируют пузырьки газа, выходящие через неплотности ножек, погруженных в жидкость, при давлении на их конструктивные элементы, равном 1,1–1,3 МПа.

Ко второй группе относятся радиоактивные и масс-спектрометрический методы, при которых непосредственно определяют герметичность контролируемых корпусов или помещают их в вакуумную камеру, регистрируя изменение предварительно созданного в них разрежения, происходящего из-за проникновения пробного газа. Радиоактивный метод основан на индикации гамма-излучения радиоактивного газа, проникающего через неплотности внутрь корпуса, предварительно опрессованного в камере сжатым радиоактивным газом. Этот метод контроля герметичности является разновидностью масс-спектрометрического, наиболее совершенного и распространенного в производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

К третьей группе относят бомбовый, ацетоновый и влажностный методы проверки герметичности, основанные на изменении (ухудшении) электрических параметров полупроводниковых приборов при попадании жидкости в их корпуса. Бомбовый метод основан на опрессовке готовых полупроводниковых приборов в жидкой среде, которая, проникая внутрь негерметичных корпусов, резко изменяет их электрические параметры. При ацетоновом методе, являющемся разновидностью бомбового, вместо опрессовки приборов ограничиваются выдержкой их в ацетоне при атмосферном давлении. При влажностном методе готовые полупроводниковые приборы длительное время выдерживают в условиях повышенной влажности. Вла-

га, проникая сквозь неплотности корпусов (если они имеются), ухудшает электрические параметры приборов.

Рассмотренные методы контроля герметичности обладают различной чувствительностью (рис. 117, *а — д*). Так, самым чувствительным является радиоактивный метод (рис. 117, *а*), которым обнаруживают течи с газовым потоком до $1,32 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, но пока он не получил распространения. Второе место занимает масс-спектрометрический метод (рис. 117, *б*), предельная чувствительность которого составляет до $1,32 \cdot 10^{-9} - 1,32 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Как уже отмечалось, этот метод имеет наиболее широкое применение в полупроводниковом производстве, поэтому рассмотрим его ниже подробно. За ним следует метод повышенного давления (рис. 117, *в*), максимальная чувствительность которого составляет $1,32 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. Повышенное давление можно создать в контролируемом изделии, поместив его, например, в нагретое масло. Если из контролируемого изделия не выходят газовые пузырьки, это свидетельствует о его герметичности.

Наименее чувствительными считаются методы контроля герметичности погружением изделий в воду при атмосферном давлении и обмыливанием, которые в производстве полупроводниковых приборов применяться не могут, но обмыливание является одним из широко распространенных методов отыскания течей в газовых системах и применяется при эксплуатации, например, газового термического оборудования. Чувствительности методов погружения в воду и обмыливания даны на рис. 117, *з, д* для сравнения.

В последнее время находят применение такие новые методы контроля герметичности, как электронно-захватный и диффузионно-магниторазрядный.

Электронно-захватный метод контроля герметичности основан на обнаружении (индикации) пробного газа, вытекающего через течи контролируемых приборов. Для обнаружения малых и средних течей используют элегаз, а средних и больших — воздух. Элегаз — химически инертное вещество, имеющее температуру разложения 650°C , биологически безвредное и не обладающее коррозионной активностью. Газоанализатором как для элегаза, так и для воздуха служит электронно-

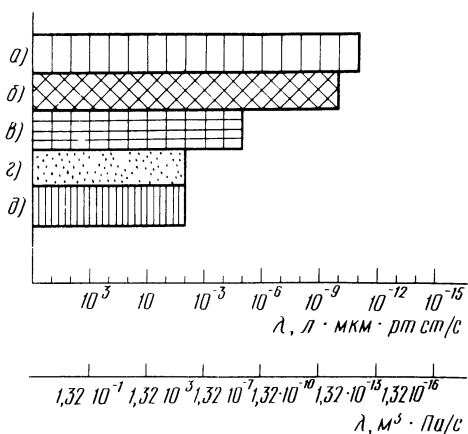


Рис. 117. Предельная чувствительность различных методов контроля герметичности:

а — радиоактивного, *б* — масс-спектрометрического, *в* — повышенного давления, *г* — погружения в воду, *д* — обмыливания.

захватный течеискатель, в котором совмещено обнаружение больших и малых течей.

Для определения герметичности подлежащие контролю изделия эспрессовывают (герметизируют) в атмосфере элегаза, а затем выдерживают некоторое время на воздухе для удаления (десорбции) элегаза с поверхностей и из объемов с большими течами. Объем негерметичных изделий вместо элегаза заполняется воздухом. Затем изделия помещают в камеру устройства регистрации, изолируют от атмосферы и продувают газом-носителем, не содержащим пробных газов. Появление в газе-носителе примеси пробного газа, обнаруживаемого электронно-захватным течеискателем, свидетельствует о наличии течей.

Этот метод позволяет обнаружить течи с потоком пробного газа от $2 \cdot 10^{-10}$ до $10^2 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ в изделиях, внутренний объем которых составляет около $3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$, опрессованных при давлении 0,5 МПа в течение 3 ч.

Д и ф ф у з и о н н о - м а г н и т о р а з р я д н ы й м е т о д к о н т р о л я г е р м е т и ч н о с т и основан на регистрации вытекающего из внутренних полостей негерметичных изделий гелия, который в них вводится при опрессовке или герметизации.

Преобразователем установки контроля герметичности этим методом служат диффузионно-магниторазрядный индикатор, представляющий собой замкнутый сосуд со встроенным миниатюрным магниторазрядным насосом, контактирующий с пробным газом через мембрану из кварцевого стекла, проницаемого преимущественно для гелия. Изменение давления гелия перед мембраной вызывает изменение разрядного тока магниторазрядного насоса.

Установка контроля герметичности диффузионно-магниторазрядным методом представляет собой восьмикамерную (восьмипозиционную) карусель, пять позиций которой являются контрольными; две соединены с устройствами разбраковки, а одна — с устройством дополнительной опрессовки. Технологический процесс проверки герметичности состоит из следующих операций: предварительной опрессовки изделий в течение 3 ч в гелии; выдержки в течение 20 мин на воздухе; кратковременной (10–15 с) дополнительной опрессовки; контроля в камерах карусели. В начальный период отбраковываются изделия с большими течами, а затем — со средними и малыми. Установка работает в полуавтоматическом режиме, т.е. оператор загружает изделия вручную, а их контроль, разбраковка и выгрузка производятся автоматически.

Основными достоинствами этой установки контроля являются возможность отбраковки изделий с большими течами (щелями и трещинами), высокая производительность (900 шт/ч), простая и надежная конструкция. Диапазон выявляемых течей от $1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$ до видимых щелей и трещин.

§ 56. Масс-спектрометрический метод контроля герметичности корпусов

В полупроводниковом производстве масс-спектрометрический метод широко применяют, так как он нетоксичен и позволяет механизировать и автоматизировать процесс контроля герметичности. Для обнаружения (индикации) этим методом пробного газа, вытекающего через микроотверстия

или неплотности в корпусах, используют масс-спектрометрический газовый анализатор-датчик — течеискатель ПТИ. В качестве пробного газа обычно применяют гелий — инертный безвредный газ, содержащийся в очень незначительных количествах ($5 \cdot 10^{-4} \%$) в воздухе. Гелий обладает малой атомной массой и поэтому занимает второе место (после водорода) по способности просачиваться через микронеплотности.

При контроле полупроводниковых приборов на герметичность гелий вводят в их корпуса тремя способами. При первом способе корпуса герметизируют в гелиевой атмосфере, применяя специальный инструмент, обеспечивающий подачу гелия только в момент герметизации.

Второй способ ввода гелия состоит в опрессовке в специальном устройстве (гелиевой бомбе) загерметизированных, но не окрашенных и гальванически не покрытых приборов, так как микротверстия в их корпусах могут быть открыты для доступа гелия краской или пленкой металла покрытия и брак обнаружится только при эксплуатации.

Третий способ заключается в обдуве гелием корпуса прибора (ножки), находящегося под вакуумом, и применяется для контроля герметичности незагерметизированных корпусов (т.е. без крышек), объем которых специально уплотняют.

Принцип действия масс-спектрометра со 180-градусной фокусировкой, который является одним из основных устройств, входящих в конструкцию течеискателя ПТИ, состоит в следующем. Раскаленный катод, находящийся в вакуумной камере масс-спектрометра, эмитирует электроны, фокусирующиеся магнитным и ускоряющиеся электрическим полем, приложенным между катодом и камерой ионизатора. Сталкиваясь с молекулами газов, в том числе и молекулами гелия, попавшими в вакуумную систему масс-спектрометра, электроны ионизируют газ. Образовавшиеся ионы вытягиваются из камеры, фокусируются в пучок, ускоряются и направляются в анализатор, где происходит их разделение по массам в однородном (постоянном) магнитном поле.

В однородном магнитном поле могут быть разделены по массам ионы, обладающие одинаковой энергией. Так как начальная энергия (энергия теплового движения) электронов по сравнению с энергией, которую получают ионы в ионизаторе, мала, их начальной энергией можно пренебречь и считать, что они входят в анализатор, обладая одинаковой с ионами энергией. Принцип действия анализатора был описан в § 24.

Коллектор, воспринимающий выделенный пучок ионов гелия, соединяется с землей через высокоомный резистор, на котором слабые токи создают значительное падение напряжения, достаточное для последующего усиления и индикации. Ионные токи в течеискателе усиливаются усилителем постоянного тока.

После усиления ионный ток регистрируется измерительным прибором, расположенным на выносном пульте управления. Изменение показаний измерительного прибора свидетельствует о наличии течи и о ее размерах. Дополнительно к пульту управления можно подключить самопишущие приборы. Одновременно с изменением показаний измерительного прибора усиленное напряжение ионного тока управляет частотой звукового индикатора те

чи (сирены), которая понижается до низких тонов при попадании в камеру частиц гелия.

Для проверки чувствительности и калибровки течеискателя применяют эталонное устройство — калиброванную течь, в которой создано и поддерживается стабильно во времени натекание гелия из запаянного металлостеклянного объема. Естественно, что эталонное устройство должно находиться в идентичных с контролируемым объектом условиях испытания (давлении, температуре, влажности, процентном содержании пробного газа и т.д.).

Масс-спектрометрический метод имеет некоторые недостатки: сравнительно низкую производительность, даже при условии механизации и автоматизации; сложность обслуживания установок и необходимость в высококвалифицированных специалистах. Кроме того, кратковременность контроля не позволяет обнаружить в корпусах приборов малые течи, а также отбраковывать корпуса с большими течами, если введенный гелий выйдет из них прежде, чем они будут подвергнуты контролю (т.е. в корпусе не окажется пробного газа). Поэтому масс-спектрометрическим методом производят только выборочный контроль герметичности, а основным методом должен быть более простой, которым можно проверить 100 % приборов, например вакуумно-жидкостный.

Промышленностью выпускаются течеискатели ПТИ-7 и ПТИ-10, причем второй прибор обладает большими стабильностью работы измерительной схемы и чувствительностью, которая равна $6,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$. При этом чувствительность метода равна газовому потоку, имеющему течь $1,32 \cdot 10^{-9} - 1,32 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$.

Контрольные вопросы

1. Зачем герметизируют корпуса полупроводниковых приборов и микросхем?
2. Каковы достоинства и недостатки герметизации корпусов контактной электро-сваркой?
3. Корпуса каких приборов целесообразно герметизировать лазерной сваркой?
4. Каков принцип действия установки электронно-лучевой сварки?
5. Как регулируют тепловую мощность плазменной струи горелки?
6. Какими методами контролируют герметичность корпусов?
7. Как оценивают герметичность корпусов?
8. Каковы принципы масс-спектрометрического, электронно-захватного и диффузионно-магниторазрядного методов контроля герметичности?

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ. ОСНОВЫ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Комплексная автоматизация производства предусматривает замену ручного труда машинами и механизмами на всех операциях технологического процесса, а также передачу функций управления и контроля автоматическим устройствам и системам (АСУ) на базе широкого использования управляющих электронно-вычислительных машин.

Для автоматического управления технологическими процессами используют системы АСУТП, назначением которых является контроль и управление производством с целью повышения производительности труда и качества выпускаемой продукции. Внедрение АСУТП требует предварительной подготовки, которая состоит в перестройке технологического процес-

В электронной промышленности автоматизированные системы управления служат для автоматизированного контроля технологических операций; оптимизации технологического процесса с использованием обратной связи; определения влияния отклонений, происходящих в технологическом процессе на качество выпускаемых изделий и процент выхода годной продукции; повышения производительности труда.

При работе АСУТП технолог со своего пульта 11 извещает по переговорному устройству 20 оператора АСУ о характере проведения термического процесса, называя вид термической обработки (отжиг, пайка или вжигание металлизации), материал и габариты деталей, марку припоя. В зависимости от сообщенных данных оператор АСУ определяет номер технологического процесса и нажатием кнопки на пульте считывателя 6 вводит в память управляющей ЭВМ записанную на перфоленте программу.

Рис. 118. Структурная схема АСУ многопостовым термическим оборудованием:

минуту по сигналу от таймера 1. Микропроцессор 19 (МЦКУ) сравнивает заданную температуру с температурой объекта регулирования (термической установки) 17, которая фиксируется датчиком 18. При разбалансе вырабатывается сигнал управления, воздействующий на исполнительное устройство (тиристорный регулятор мощности) 16, приводящее систему в равновесие.

Для удобства управления технологическим процессом, проводимым в колпаковых печах, его разбивают по времени на пять этапов. Если продолжительность каждого этапа равна постоянной времени, заложенной в память управляющей ЭВМ, происходит опрос датчика (термоэлектрического преобразователя) 13 объекта регулирования и сравнение его показаний с показаниями, заложенными в память вычислительной машины. При равенстве значений сбрасываются показания счетчика минут, прибавляется единица на счетчике этапов, расположенном на пульте технолога, и в память управляющей ЭВМ записываются номер выполненного этапа, его продолжительность, конечная температура, а также данные о содержании кислорода и паров воды в газовой атмосфере печи, соответственно поступающие от датчиков 14 и 15. Преобразование сигналов датчиков 13, 14 и 15 в унифицированные сигналы происходит в блоках 12. Унифицированные сигналы поступают через входной коммутатор 3 в аналого-цифровой преобразователь 2, кодируются и направляются в память ЭВМ.

При нарушении режима технологического процесса технолог извещается об этом через пульт управления и принимает решение о целесообразности дальнейшего автоматического управления. Если принято решение о продолжении технологического процесса, АСУ переходит к очередному этапу управления. По окончании последнего этапа регистрирующее устройство 5 печатает карту технологического процесса с подробным фиксированием регистратором отклонений 21 нарушений хода регулирования. После анализа полученных данных можно подготовить на перфораторе 7 новую программу. Проведение термического процесса постоянно отображается на пульте технолога.

Многопозиционное регулирование позволяет усовершенствовать управление технологическим процессом, а также сократить время снятия показаний контролирующим устройством в точках контроля, так как только после этого происходит сравнение действительных параметров с заданными.

Система автоматизированного управления процессами диффузии и окисления (рис. 119) построена примерно по такой же схеме, как рассмотренная. При анализе процессов диффузии и окисления параметры, влияющие на ход легирования и защиты полупроводниковых пластин, можно разделить на управляемые, контролируемые и стабилизируемые. Управляемыми являются параметры, обеспечение которых зависит от времени пропускания диффузанта, а также влажного и сухого кислорода. Контролируемый параметр — температура при первой и второй стадиях диффузии. Стабилизируемые параметры определяют качество выполнения технологического процесса. К ним относятся удельное сопротивление исходного кремния, температура реагентов в дозаторе, расход аргона, кислорода, время подачи сухого кислорода и др. Система автоматического управления процессами диффузии и окисления позволяет получить максимальную вос-

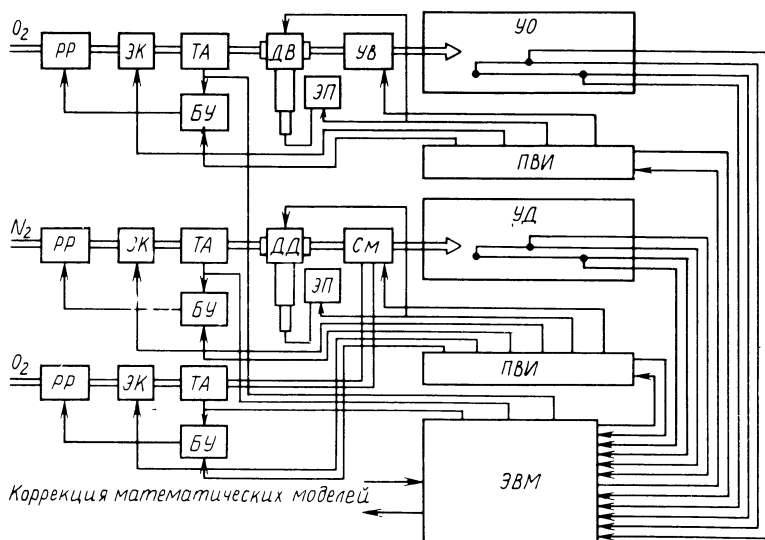


Рис. 119. Структурная схема АСУ процессами диффузии и окисления:
 PP — регулятор расхода газа, ЗК — электромагнитный клапан, ТА — термо-
 анемометр—датчик расхода газа, БУ — блок управления регулятором рас-
 хода газа, ДВ — дозатор воды, ДД — дозатор диффузанта, ЭП — электро-
 механический привод дозатора, Ув — увлажнитель, См — смеситель газов,
 ПВИ — программатор временных интервалов, ЭВМ — управляющая электрон-
 но-вычислительная машина

производительность результатов и перестраиваться на выпуск изделий другой номенклатуры в серийном производстве.

Управляет технологическим процессом программатор временных интервалов ПВИ, коммутирующий технические средства автоматической системы управления (приборы и устройства регулирования температуры) по заданной программе. Наряду с этим в управлении процессами диффузии и окисления используются сигналы о расходах газов, паров воды и диффузанта. Контролирует и анализирует стабильность протекания процессов управляющий вычислительный комплекс — ЭВМ "Электроника-100" с набором внешних устройств (для сбора, хранения, обработки больших массивов информации и др.).

На рис. 120 показана АСУТП термической обработки изделий в термических установках СДО, имеющих программное устройство ПУ, состоящее из программатора П, датчика времени ДВ, логического блока ЛБ и механизма подачи МП кассет с пластинами. Такое автоматизированное управление пригодно для термических процессов, в которых решающее значение имеет скорость подъема и снижения температуры. С помощью ЭВМ можно рассчитать режим перемещения кассет по рабочему каналу термической установки ТУ. Например, согласно программе механизм подачи может перемещать кассеты с точностью 1 мм, что соответствует скорости нагрева или охлаждения пластин от 100 до 1°C в минуту.

Дальнейшим развитием комплексной автоматизации является созда-

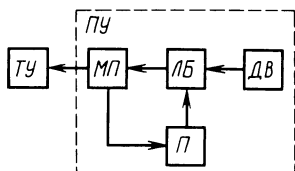


Рис. 120. Структурная схема программного устройства для проведения термических процессов в установках СДО

ние гибких автоматизированных производств (ГАП) на базе широкого использования роботов и робототехнологических комплексов.

Устройство, предназначенное для выполнения различных операций в автоматическом режиме без участия человека, называют роботом (автоматом со сложными функциями, автоматическим манипулятором, механическими руками). Под робототехнологическим комплексом (РТК) понимают совокупность оборудования, работающего с одним роботом и обеспечивающего полностью автоматизированный цикл производства и взаимодействие с его входными и выходными потоками.

Рассмотрим работу РТК, оснащенного автоматизированной транспортной системой (АТС), на примере автоматической поточной линии диффузии АПЛ-Д (см. § 21).

По команде оператора (с центрального пульта) механизмом групповой перегрузки вызывается кварцевая кассета для переукладки в нее пластин из транспортной кассеты. По следующей команде оператора манипулятор устанавливает на трассу АТС загруженную кварцевую кассету и каретка-оператор транспортирует ее по заданному адресу к загрузочной системе одного из реакторов. Затем манипулятор загрузочной системы реактора подает кварцевую кассету на приемную площадку механизма автоматической смены кассет и загрузочное устройство вводит ее с заданной скоростью в реактор диффузионной печи. После закрытия реактора кварцевая кассета с пластинами перемещается в нем по заданной программе. Полупроводниковые пластины при термической обработке совершают колебательные движения вдоль оси реактора, что исключает их прилипание к кварцевой кассете.

По окончании процесса термической обработки автоматически по очередной команде оператора открывается реактор, кассета с пластинами поступает на площадку механизма смены кассет, происходит смена площадок и очередная кассета с пластинами поступает в реактор, а вышедшая из него определенное время охлаждается, а затем вызывается на центральный пульт, где механизмом групповой перегрузки пластины из нее перекадываются в транспортную кассету, которая передается в накопитель длительного хранения.

Автоматическая транспортная система, выполненная по принципу структурно-модульного и конструктивного агрегатирования, обеспечивает доставку кварцевых кассет с пластинами, их накопление, мобильность потоков кассет и управление их движением, заданный ритм работы и высокую производственную гигиену. Транспортировка пластин от центрального пульта к реакторам и обратно выполняется по рельсовой трассе кареткой-оператором со скоростью 0,2 м/с. Трасса изготовлена из легкого самонесущего профиля и оснащена двумя шинами для подвода электропитания и

двумя для управления и блокировки. Трасса имеет встречное движение по двум парам рельс и может проходить по одному этажу, образуя замкнутую кольцевую линию, или по нескольким этажам.

Привод каретки осуществляется от электродвигателя постоянного тока с подводом питания через скользящие контакты. Каждая каретка снабжена двумя флажками, один из которых задает адрес, а другой определяет наличие кассеты с пластинами. Адрес каретке задается оператором в соответствии с технологическим процессом по кратчайшему пути ее следования к месту назначения. В местах загрузки перегрузки кассет имеются посты емкостью на три каретки со стрелочными переводами и считывающими устройствами.

Автоматическая транспортная система имеет пульт управления, который служит для перевода стрелок и поворота их на 90° , останова и перевода на 90° , накопления на приемных площадках кареток, посылки их на трассу, а также блокирования участков трассы от столкновений кареток.

Для проведения в едином технологическом цикле вакуумно-термических процессов на автоматических и поточных линиях и установках камерного типа, предусматривающих автоматизацию внутрикамерных операций и межоперационную транспортировку изделий в герметичных условиях, применяют манипуляторы, принцип действия которых основан на упругой деформации трубчатых элементов, подобно трубкам Бурдона, применяемым в манометрах. Такие манипуляторы представляют собой однозвенные механизмы, не имеющие узлов внешнего трения, обладающие малой металлоемкостью, высокими надежностью и быстродействием, минимальной поверхностью, находящейся в вакуумном объеме, а также большими возможностями создания перемещений по различным траекториям. Манипуляторы с упругодеформируемыми элементами приводятся в действие давлением газа (жидкости), который подают во внутреннюю полость трубки, в результате чего она деформируется и отклоняется.

Манипуляторы с упругодеформируемыми элементами вместе с такими устройствами, как сифоны, мембраны и кулачки, могут применяться для привода экранов, очистки смотровых окон, перемещения (перестановки) обрабатываемых изделий в вакуумных установках при высоком вакууме. Гибкая производственная система (ГПС) — это комплекс автоматического оборудования модульного исполнения, управляемого ЭВМ, связанного между собой автоматическим транспортом и предназначенного для изготовления определенных изделий с возможностью быстрой перестройки на другие их модификации.

Для широкого внедрения ГПС необходимо:

- создание современного высококачественного оборудования с обязательным программным его дублированием;

- разработка технологических процессов, предусматривающих групповую обработку как однотипных, так и разнообразных по геометрическим и физическим характеристикам деталей с одновременным определением точек контроля и выявлением отклонений параметров работы оборудования для возможности автоматического управления;

- выпуск материалов требуемых кондиций;

- создание автоматических складов различных уровней, оснащенных

контроллерами и транспортными средствами, управляемых ЭВМ и ведущих учет и перемещение материалов и деталей по определенным маршрутам.

Управление автоматической работой ГПС может иметь несколько уровней. Нижним уровнем считают управление отдельными единицами оборудования и роботами с помощью микропроцессора, средним — группой оборудования и роботов с помощью ЭВМ, а высшим — использование ЭВМ и микропроцессоров для конструирования изделий, разработки технологического процесса, подготовки производства и ГПС для синхронной работы. Каждый уровень управления предусматривает программную совместимость всех звеньев производства в единый комплекс.

Основными компонентами ГПС являются гибкий производственный модуль (ГПМ), автоматические транспортная и складская системы (АТС и АСС). Гибкий производственный модуль предназначен для загрузки заготовок и выгрузки изделий, контроля правильности установки заготовок, состояния инструмента и параметров изделий, очистки рабочего пространства от отходов и удаления их, диагностики технического состояния оборудования и поиска неисправностей в нем, управления технологическим процессом и связи с верхним уровнем управления для обмена информацией и приема управляющих сигналов.

Автоматическая транспортная система обеспечивает получение из автоматической складской системы и возврат заготовок, материалов, полуфабрикатов, инструмента, оснастки, перемещение их в различных направлениях, перекладку с одних транспортных средств на другие, установку на приемные устройства. В зависимости от условий производства в ГПС применяют транспортные средства трех видов: электророботы, подвесные транспортные роботы и конвейерные системы.

В гибких производственных системах должны применяться автоматические складские системы нескольких уровней: общезаводская материалов и внешней комплектации (первый уровень); заготовительных производств (второй уровень); двухсекционных механообрабатывающих цехов — для заготовок и готовых деталей (третий уровень); сборочных цехов основного производства (четвертый уровень); готовой продукции (пятый уровень).

Контрольные вопросы

1. Что понимают под комплексной автоматизацией?
2. Каково назначение автоматизированных систем управления технологическими процессами?
3. Каково взаимодействие элементов АСУ термическим оборудованием пайки, вжигания, металлизации и отжига?
4. Как управляет АСУ технологическими процессами диффузии и окисления?
5. Каково назначение роботов и робототехнологических комплексов?
6. Каков принцип построения гибких производственных систем?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прочитав эту книгу, вы ознакомились с технологическим процессом изготовления изделий микроэлектроники и теперь представляете себе, какой сложный путь проходят полупроводниковые кристалл и пластина, прежде чем превратиться соответственно в полупроводниковый прибор или микросхему. При этом достаточно подробно рассмотрены термические процессы, выполняемые оператором, профессию которого вы выбрали.

Квалифицированный рабочий полупроводникового производства должен много знать и уметь: разбираться в физико-химических свойствах материалов, представлять технологический процесс в целом, отлично владеть своей основной профессией и хорошо — профессией смежников.

Только при этом условии можно плодотворно и ответственно трудиться так, чтобы результаты работы доставляли удовлетворение.

Изобретенный в 1948 г. У. Шокли, Д. Бардиным и У. Браттейном транзистор менее чем за 40 лет завоевал весь мир. Сейчас нам не представляется жизнь без полупроводниковой микроэлектроники. Она повсюду вокруг нас: это бытовая, вычислительная, управляющая и космическая техника. Развитие производства изделий микроэлектроники стремительно и работать в нем может лишь тот, кто постоянно повышает свой технический уровень.

Современное состояние науки, широкое внедрение в производство электронно-вычислительной техники, робототехнологических комплексов и гибких производственных систем, оборудования с числовым программным управлением требуют постоянного совершенствования знаний, ибо английский философ Фрэнсис Бэкон (1561—1626) писал, что тот, кто не обновляется — разрушается, так как неумолимое течение времени все изменяет.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

А л е к с а н д р о в В.К. Шаги к микроразмерам: методы микроминиатюризации — Мн.: Наука и техника, 1983.

Б е р А.Ю., М и н с к е р Ф.Е. Сборка полупроводниковых приборов и микросхем. — М.: Высшая школа, 1986.

Д а н и л и н Б.С., С ы р ч и н В.К. Магнетронные распылительные системы. — М.: Радио и связь, 1982.

К у р н о с о в А.И. Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1980.

К у ч и н А.И., Р а д ч е н к о Л.А., Л е с и ш Ю.К. Методы автоматизированного управления технологией производства электронных приборов. — М.: Радио и связь, 1981.

М о к е е в О.К., Р о м а н о в А.С. Химическая обработка и фотолитография в производстве полупроводниковых приборов и микросхем. — М.: Высшая школа, 1985.

М о р я к о в О.С. Сварка и пайка в полупроводниковом производстве. — М.: Высшая школа, 1982.

М о р я к о в О.С. Устройство и наладка оборудования полупроводникового производства. — М.: Высшая школа, 1981.

Т е л е ш е в с к и й Б.Е. Измерения в электро- и радиотехнике. — М.: Высшая школа, 1984.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Введение	4
Глава первая. Основные сведения о контрольно-измерительных приборах.	6
§ 1. Электро- и радиоизмерительные приборы	6
§ 2. Термоэлектрические преобразователи и термометры сопротивления	13
§ 3. Приборы для измерения и регулирования температуры	17
§ 4. Приборы для измерения давления и расхода	22
§ 5. Приборы для измерения параметров атмосферы производственных помещений	29
§ 6. Информационно-измерительные системы	32
Глава вторая. Основные сведения о технологическом процессе производства полупроводниковых приборов и микросхем	34
§ 7. Электронная гигиена	34
§ 8. Технологические среды	37
§ 9. Очистка полупроводниковых пластин, технологической оснастки и тары	40
§ 10. Полупроводниковые приборы, микросхемы и их корпуса.	41
§ 11. Обработка полупроводниковых материалов и подложек.	46
§ 12. Фотолитография.	47
Глава третья. Термические процессы в микроэлектронике	52
§ 13. Общие сведения	52
§ 14. Способы теплопередачи	56
§ 15. Классификация технологических процессов и оборудования	58
§ 16. Автоматические системы регулирования и поддержания температуры	59
Глава четвертая. Термические процессы изготовления электронно-дырочных переходов диффузией примеси.	64
§ 17. Общие сведения	64
§ 18. Технологические методы нанесения оксидных пленок	65
§ 19. Технология диффузионных процессов	69
§ 20. Контроль качества диффузионных слоев и оксидных пленок	72
§ 21. Термическое оборудование для выполнения процессов окисления и диффузии.	78
Глава пятая. Эпионная технология в производстве изделий микроэлектроники	85
§ 22. Общие сведения	85
§ 23. Изготовление электронно-дырочных переходов эпионной технологией	86
§ 24. Оборудование для выполнения процессов эпионной технологии	90
Глава шестая. Технологические процессы наращивания эпитаксиальных слоев.	94
§ 25. Общие сведения	94
§ 26. Технология наращивания эпитаксиальных слоев	97
§ 27. Контроль и измерение параметров эпитаксиальных слоев	101

§ 28. Оборудование для наращивания эпитаксиальных слоев.	103
Глава седьмая. Основы вакуумной техники	111
§ 29. Общие сведения	111
§ 30. Средства создания вакуума.	113
Глава восьмая. Технология нанесения металлизации.	122
§ 31. Общие сведения	122
§ 32. Нанесение тонких пленок методом испарения и конденсации в вакууме	125
§ 33. Нанесение тонких пленок методом ионного распыления	127
§ 34. Нанесение тонких пленок методом магнетронного распыления.	130
§ 35. Измерение толщины пленок	133
§ 36. Многослойная металлизация	134
§ 37. Нанесение толстых пленок	136
§ 38. Ионно-плазменное травление	140
§ 39. Вакуумные установки для нанесения тонких пленок	144
§ 40. Изготовление полупроводниковых приборов и микросхем по планарной технологии	149
Глава девятая. Технология сборочных работ.	151
§ 41. Общие сведения о монтаже кристаллов	151
§ 42. Контактная-реактивная пайка	152
§ 43. Пайка эвтектическими сплавами.	154
§ 44. Общие сведения о присоединении электродных выводов.	156
§ 45. Термокомпрессионная сварка	160
§ 46. Ультразвуковая сварка	164
§ 47. Оборудование для монтажа кристаллов в корпуса и присоединения электродных выводов термокомпрессионной и ультразвуковой сваркой	166
§ 48. Микроконтактная сварка	169
§ 49. Пайка электродных выводов.	171
Глава десятая. Герметизация полупроводниковых приборов и микросхем. Контроль герметичности	172
§ 50. Общие сведения	172
§ 51. Герметизация корпусов контактной контурной электросваркой.	173
§ 52. Герметизация корпусов лазерной сваркой.	180
§ 53. Герметизация корпусов электронно-лучевой сваркой.	182
§ 54. Герметизация корпусов микроплазменной сваркой.	184
§ 55. Контроль герметичности корпусов	185
§ 56. Масс-спектрометрический метод контроля герметичности корпусов	187
Глава одиннадцатая. Основы комплексной автоматизации термических процессов.	189
Заключение.	196
Рекомендуемая литература	197

Учебное издание

Олег Сергеевич Моряков

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Зав. редакцией *С.В. Никитина*

Редактор *А.Ш. Долгова*

Мл. редакторы *Г.П. Каневская, Л.Н. Щелкова*

Художник *Н.Н. Аникушин*

Художественный редактор *Е.Д. Косырева*

Технические редакторы *Ю.А. Хорева, И.А. Балелина*

Корректор *В.В. Кожуткина*

Оператор *О.М. Кузьмина*

ИБ № 5605

Изд. № ЭГ-120. Сдано в набор 02.07.86. Подп. в печать 13.10.86.
Формат 60×90¹/₁₆. Бум. офс. № 2. Гарнитура Универс. Печать офсетная.
Объем 12,5 усл. печ. л. 12,75 усл. кр.-отт. 15,28 уч.-изд. л. Тираж 10 000 экз.
Зак. № 896. Цена 40 коп.

Издательство "Высшая школа", 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Набрано на наборно-пишущих машинах издательства. Отпечатано в Московской типографии № 8 "Союзполиграфпрома" при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.

