

ТЕХНОЛОГИЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ И ИЗДЕЛИЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

КНИГА **6**

В. Е. Минайчев

НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

ББК 31.233
Т 38
УДК 621.382

В.Е. Минайчев

Р е ц е н з е н т ы: канд. техн. наук Ю.С. Чернозубов (Московский институт электронного машиностроения); преп. И.А. Малышева (Московский техникум электронных приборов)

Т $\frac{2302030700 (4307000000) - 365}{052 (01) - 89}$ 61-89

ББК 31.233
6 Ф0.32

ISBN 5-06-000308-6

© Издательство "Высшая школа", 1989

ВВЕДЕНИЕ

Тонкие пленки, наносимые в вакууме, широко применяются в производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС), а также при изготовлении фотошаблонов — основного технологического инструмента микроэлектроники. В настоящее время тонкопленочные элементы занимают до 80 % площади полупроводниковых кристаллов, что обусловлено постоянным функциональным усложнением ИМС.

Получение высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных слоев является одним из важнейших технологических процессов формирования структур как дискретных диодов и транзисторов, так и активных и пассивных элементов ИМС. Тонкие пленки наносятся также при заключительных технологических операциях изготовления полупроводниковых приборов и ИМС, т. е. после выполнения множества других операций. При этом брак особенно экономически ощутим и, естественно, должен быть сведен до минимума.

Таким образом, от совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок в значительной степени зависят надежность и качество изделий микроэлектроники, технический уровень и экономические показатели их производства.

Тонкопленочная технология базируется на сложных физико-химических процессах и применении различных металлов и диэлектриков. Так, тонкопленочные резисторы, электроды конденсаторов и межсоединения выполняют осаждением металлических пленок, а межслойную изоляцию и защитные покрытия — диэлектрических.

Важным этапом является контроль параметров тонких пленок (скорости их нанесения, толщины и ее равномерности, поверхностного сопротивления), который проводится с помощью специальных приборов как при выполнении отдельных технологических операций, так и по завершении всего процесса.

Наносят тонкие пленки в вакууме методами термического испарения и ионного распыления. При первом методе используют испарители с резистивным или электронно-лучевым нагревом, а при втором — системы диодного или магнетронного распыления.

Для реализации этих методов разработки специальные вакуумные установки периодического полунепрерывного и непрерывного действия, на которых можно наносить несколько различных по составу и свойствам слоев из разных источников в

едином технологическом цикле. При этом исключается воздействие атмосферного воздуха на каждый нанесенный слой, повышается производительность за счет уменьшения циклов откачки рабочих камер, а также нагрева и охлаждения подложек, появляется возможность полной автоматизации установок на основе микропроцессорных систем управления.

Эффективность работы современного вакуумного оборудования для нанесения тонких пленок, оснащенного откачными системами, в которые входят насосы различных принципов действия, специальная арматура и приборы для измерения вакуума, во многом зависит от правильности его эксплуатации, знания персоналом основ вакуумной техники.

При нанесении тонких пленок очень важно строго соблюдать электронно-вакуумную гигиену. Загрязнения в виде примесей химически активных газов, попадающие на поверхность обрабатываемых подложек как при проведении технологических операций, так и при межоперационном транспортировании и хранении, могут существенно изменять структуру и электрофизические свойства наносимых слоев. Оседание мельчайших частиц пыли может привести к необратимому браку пленочных структур — обрывам и замыканиям межсоединений. Поэтому оборудование для нанесения тонких пленок обычно устанавливают в чистых комнатах — гермозонах, а обслуживающий его персонал должен следить за чистотой рабочего места и технологической тары, а также обязательно работать в спецодежде.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ И МИКРОСХЕМАХ

§ 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Производство как дискретных (отдельных) полупроводниковых приборов, так и интегральных микросхем (ИМС) в основном базируется на одних и тех же технологических процессах (эпитаксии, фотолитографии, травлении, диффузии, нанесении пленок и др.). Следует отметить, что при изготовлении всех видов полупроводниковых приборов и ИМС в том или ином объеме используется технологический процесс нанесения тонких пленок в вакууме — тонкопленочная технология.

Рассмотрим применение тонких пленок на примере изготовления транзистора, так как он является не только дискретным полупроводниковым прибором, но и основным элементом ИМС.

Дискретный полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления тока или иного преобразования электрических сигналов, называют *транзистором*. Планарный транзистор (рис. 1) представляет собой кристалл полупроводника с двумя *p-n*-переходами, образующими коллектор 5, эмиттер 3 и базу 4. После формирования *p-n*-переходов в кристалле полупроводника нанесением металлических пленок в вакууме создают омические контакты 1 к базе и эмиттеру.

Наиболее часто вследствие простоты и технологичности применяют омические контакты из алюминия. Если выводы подсоединяют пайкой, на алюминий дополнительно наносят слой золота. Омические контакты на кремнии электропроводности *n*-типа выполняют из золота, которое для улучшения адгезии вжигают при 370–500° С. Высокотемпературные контакты на кремнии получают последовательным нанесением слоя хрома, а затем никеля, который допускает пайку обычными припоями. Большое распространение получили алюминиевые контакты с подслоем титана, который обладает высокой адгезией к кремнию. Так как слой титана на воздухе быстро окисляется, что препятствует надежному присоединению электрического вывода, на него наносят слой золота, серебра или никеля.

Микроминиатюрный функциональный электронный блок, совокупность рабочих элементов которого изготовлена в едином комплексе групповых технологических процессов, называют *интегральной микросхемой (ИМС)*. Показателем слож-

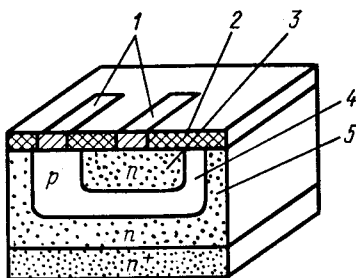
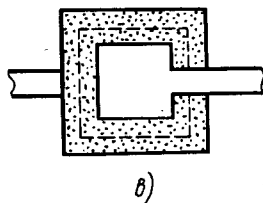
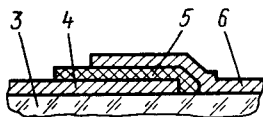
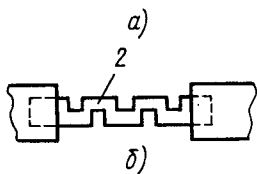
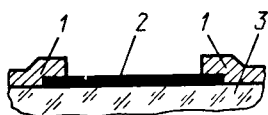


Рис. 1. Структура планарного транзистора:

1 — тонкопленочные контакты, 2 — оксидный слой, 3 — эмиттер, 4 — база, 5 — коллектор

Рис. 2. Структура тонкопленочных резисторов (а, б) и конденсатора (в):

1 — контактные выводы, 2 — резистивная пленка, 3 — диэлектрическая подложка, 4, 6 — нижний и верхний металлические пленочные электроды, 5 — пленочный диэлектрик

ности ИМС является *степень интеграции*, которая характеризуется количеством элементов, входящих в интегральную схему. По технологическим методам изготовления ИМС делятся на пленочные, гибридные и полупроводниковые (монолитные). Эти методы не являются конкурирующими, а дополняют друг друга.

В пленочных ИМС все элементы (резисторы, конденсаторы) и межэлементные соединения выполняются в виде пленок. Пленочные ИМС создают послойным нанесением тонких пленок различных материалов на общее основание — диэлектрическую подложку. На пленочных элементах, как правило, выполняются различные резистивно-емкостные схемы (RC-схемы).

Тонкопленочный резистор (рис. 2, а, б) — элемент микросхемы, размещенный на диэлектрической подложке 3 и способный оказывать сопротивление электрическому току, состоит из двух контактных выводов 1 и резистивной пленки 2 линейной или зигзагообразной конфигурации.

Сопротивление пленочных резисторов определяют по сопротивлению $R_{\square}$ (Ом/квадрат) квадрата тонкопленочного материала толщиной d_n , к двум противоположным сторонам которого подведены контактные выводы:

$$R_{\square} = \rho/d_{\Pi}, \quad (1)$$

где ρ — удельное объемное сопротивление пленки.

Таким образом, сопротивление пленочного резистора не зависит от размера стороны квадрата и равно его поверхностному сопротивлению.

Для изготовления тонкопленочных резисторов используют сплавы, сопротивление которых во много раз больше сопротивления чистых металлов (например, нихром, МЛТ, нитрид тантала, смесь хрома и оксида кремния, металлокерамические смеси—керметы).

Тонкопленочный конденсатор (рис. 2, в) — это элемент микросхемы, способный накапливать электрический заряд и представляющий собой плоскую трехслойную структуру, состоящую из слоя диэлектрика, расположенного между двумя металлическими слоями — электродами (обкладками). Удельная емкость ($\Phi/\text{м}^2$) плоского пленочного конденсатора

$$C = 8,85 \cdot 10^{-12} \epsilon/d_{\text{д}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{д}}$ — толщина слоя диэлектрика, ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Желательно, чтобы удельная емкость пленочного конденсатора была как можно больше. Поэтому выбирают диэлектрик, обладающий большой диэлектрической проницаемостью ϵ , и стремятся уменьшить толщину $d_{\text{д}}$ пленки из него. Однако эти параметры нельзя изменять в широких пределах. Большинство используемых в тонкопленочной технологии диэлектриков имеют ϵ от 3 до 1000. При этом толщина получаемых диэлектрических пленок составляет не менее 0,3 мкм. Основной технологической задачей при изготовлении пленочных конденсаторов является получение достаточно тонких диэлектрических пленок минимальной пористости.

Номиналы тонкопленочных конденсаторов определяются точностью, с которой может быть сформирован диэлектрический слой. Допускаемая толщина диэлектрических пленок ограничивается их электрической прочностью, которая снижается вследствие сквозных пор и других дефектов.

Наиболее часто в качестве диэлектрика в тонкопленочных конденсаторах используют пленки оксидов кремния SiO и тантала Ta_2O_5 , а в качестве обкладок — пленки металлов высокой проводимости. Однако пленки золота, серебра и меди для этих целей неприемлемы, так как атомы этих металлов обладают высокой подвижностью и, проникая в диэлектрическую пленку, приводят к отказам в работе конденсаторов.

Наиболее часто обкладки конденсаторов выполняют из пленок алюминия. При этом верхние обкладки танталовых конденсаторов изготавливают из пленок алюминия с подслоем ванадия.

Контактные площадки пленочных ИМС обычно являются продолжением соединительных проводниковых линий (межсоединений) и служат для припайки или приварки внешних выводов корпуса.

Подложками пленочных ИМС служат плоские прямоугольные пластины диэлектрика, имеющие размеры 48x60, 60x96, 96x120 и толщину от 0,6 до 1,6 мм. Обычно на одну подложку одновременно наносят несколько пленочных микросхем, а затем ее разрезают. Предварительно подложки тщательно шлифуют и полируют; так как царапины и микротрещины на их поверхности вызывают нестабильность тонкопленочных микросхем.

Материалы, из которых изготавливают подложки, должны обладать высокими электрическим сопротивлением и теплопроводностью, термостойкостью до 500–600° С, малой диэлектрической проницаемостью, достаточной механической прочностью и стабильностью размеров, возможностью обработки поверхности до $R_z^{0,1} - R_z^{0,05}$, отсутствием газовыделения в условиях вакуума и повышенной температуры, химической инертностью к материалам пленок и их растворителям. Кроме того, их температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) должен быть близок к ТКЛР материала пленок. Наиболее широкое распространение для изготовления подложек получили ситаллы, алюмокерамика и стекло. Ситаллы представляют собой продукт кристаллизации стекла с очень мелкими (до 0,01 мкм) и равномерно распределенными по объему кристаллами.

Одним из важных факторов, влияющих на воспроизводимость электрофизических параметров наносимых в вакууме тонких пленок, является степень чистоты поверхности подложки. На практике идеально чистые поверхности получить невозможно, так как они чрезвычайно активны и быстро покрываются находящимися в окружающей среде газами, влагой, пылью и различными поверхностно-активными веществами, тонкие слои которых крайне трудно удалить. Очищают подложки различными физико-химическими способами.

Предварительно молекулы воды и адсорбированные молекулы газов удаляют с поверхности подложек перед нанесением пленок в вакуумной камере при температуре 200–300° С в течение 2 – 3 мин. Завершающую очистку производят ионной бомбардировкой в вакуумной камере. Если подложки поместить в зону ионов больших энергий, процесс очистки протека-

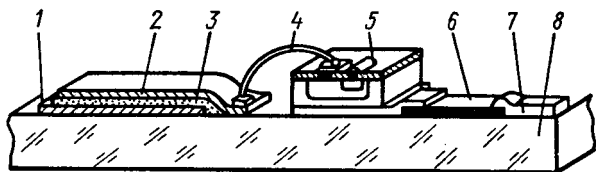
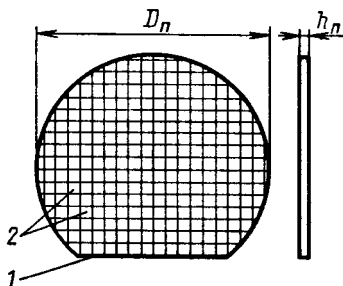


Рис. 3. Структура пленочной гибридной ИМС:

1, 2 — нижний и верхний электроды конденсатора, 3 — слой диэлектрика, 4 — проволочная соединительная шина, 5 — навесной транзистор, 6 — пленочный резистор, 7 — контактный вывод, 8 — диэлектрическая подложка

Рис. 4. Групповая кремниевая пластина:

1 — базовый срез, 2 — отдельные кристаллы (чипы)



ет в тлеющем разряде и молекулярные слои воды, газов, оксидов, а также других соединений удаляются за несколько минут.

Кроме того, необходимо знать, что возможно повторное загрязнение подложек при транспортировке их в вакуумной камере. Опасность повторных загрязнений состоит в том, что их химический состав неизвестен и не всегда одинаков. Поэтому такие загрязнения приводят к неожиданным последствиям, особенно в условиях промышленного производства.

Гибридные ИМС — это тонкопленочные микросхемы, состоящие из пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, контактных площадок) и дискретных активных элементов (диодов, транзисторов). Гибридная ИМС, показанная на рис. 3, представляет собой диэлектрическую подложку с нанесенными на нее пленочными конденсаторами и резисторами и присоединенным навесным транзистором, база которого соединена с верхней обкладкой конденсатора шиной в виде очень тонкой проволочки.

В полупроводниковых ИМС все элементы и межэлементные соединения выполнены в объеме и на поверхности кристалла полупроводника. Полупроводниковые ИМС представляют собой плоский кристалл полупроводника (подложка), в поверхностном слое которого различными технологическими приемами сформированы эквивалентные элементам электрической схемы локальные области (диоды, транзисторы, конденсаторы, резисторы и др.), объединенные по поверхности пленочными металлическими соединениями (межсоединениями).

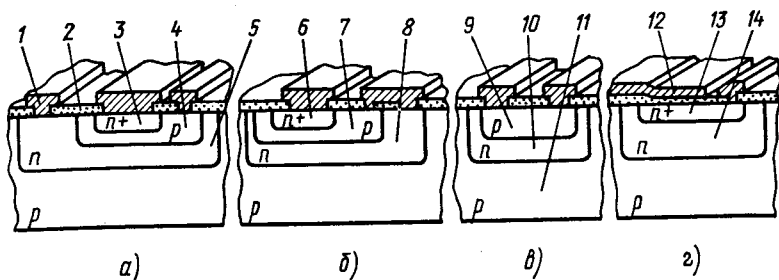


Рис. 5. Структуры элементов полупроводниковой ИМС:

а — транзистора, *б* — диода, *в* — резистора, *г* — конденсатора; 1 — тонкопленочный контакт, 2 — слой диэлектрика, 3 — эмиттер; 4 — база, 5 — коллектор, 6 — катод, 7 — анод, 8 — изолирующий слой; 9 — резистивный слой, 10 — изолирующий слой, 11 — пластина, 12, 14 — верхний и нижний электроды конденсатора, 13 — слой диэлектрика

В качестве подложек полупроводниковых ИМС служат круглые пластины кремния, германия или арсенида галлия, имеющие диаметр 60 — 150 мм и толщину 0,2 — 0,4 мм.

Полупроводниковая подложка является групповой заготовкой (рис. 4), на которой одновременно изготавливают большое количество ИМС. После завершения основных технологических операций ее разрезают на части — кристаллы 2, называемые также *чипами*. Размеры сторон кристаллов могут быть от 3 до 10 мм. Базовый срез 1 пластины служит для ее ориентации при различных технологических процессах.

Структуры элементов полупроводниковой ИМС — транзистора, диода, резистора и конденсатора, изготавливаемых соответствующим легированием локальных участков полупроводника методами планарной технологии, показаны на рис. 5, *а–г*. Планарная технология характеризуется тем, что все выводы элементов ИМС располагаются в одной плоскости на поверхности

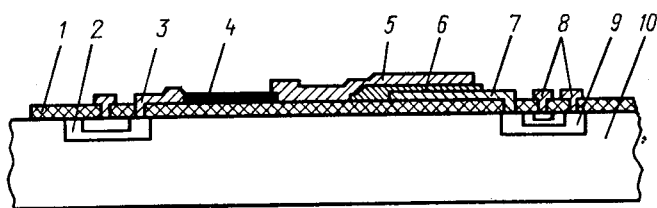


Рис. 6. Структура совмещенной ИМС:

1 — пленка диоксида кремния, 2 — диод, 3 — пленочные внутрисхемные соединения, 4 — тонкопленочный резистор, 5, 6, 7, — верхний и нижний электроды тонкопленочного конденсатора и диэлектрик, 8 — тонкопленочные контакты, 9 — кремниевая пластина, 10 — транзистор

и одновременно соединяются в электрическую схему тонкопленочными межсоединениями. При планарной технологии проводится групповая обработка, т. е. в течение одного технологического процесса на подложках получают большое количество ИМС, что обеспечивает высокие технологичность и экономичность, а также позволяет автоматизировать производство.

В совмещенных ИМС (рис. 6), являющихся вариантом полупроводниковых, на кремниевой подложке создают полупроводниковые и тонкопленочные элементы. Достоинство этих схем состоит в том, что в твердом теле технологически трудно изготовлять резисторы заданного сопротивления, так как оно зависит не только от толщины легированного слоя полупроводника, но и от распределения удельного сопротивления по толщине. Доводка сопротивления до номинального значения после изготовления резистора также представляет значительные трудности. Полупроводниковые резисторы обладают заметной температурной зависимостью, что осложняет разработку ИМС. Кроме того, в твердом теле также весьма трудно создавать конденсаторы.

Для расширения номинальных значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов полупроводниковых ИМС, а также улучшения их рабочих характеристик разработана основанная на технологии тонких пленок комбинированная технология, называемая *технологией совмещенных схем*.

В этом случае активные элементы ИМС (можно и некоторые некритичные по номинальному сопротивлению резисторы) изготовляют в теле кремниевого кристалла диффузионным методом, а затем вакуумным нанесением пленок (как в пленочных ИМС) формируют пассивные элементы — резисторы, конденсаторы и межсоединения.

Такая технология позволяет получать большие абсолютные значения сопротивлений резисторов и конденсаторов с малыми паразитными связями и низкими допусками, что увеличивает быстродействие и улучшает рабочие характеристики ИМС.

§ 2. НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

Процесс нанесения тонких пленок в вакууме состоит в создании (генерации) потока частиц, направленного в сторону обрабатываемой подложки, и последующей их конденсации с образованием тонкопленочных слоев на покрываемой поверхности. (Условимся для краткости называть частицами отдельные атомы или молекулы вещества или газа и различие между ними подчеркивать только в необходимых случаях.)

Таким образом, при нанесении тонких пленок одновременно протекают три основных процесса: генерация направленного потока частиц осаждаемого вещества; пролет частиц в разреженном (вакуумном) пространстве от их источника к обрабатываемой поверхности; осаждение (конденсация) частиц на поверхности с образованием тонкопленочных слоев.

В соответствии с этим вакуумные установки для нанесения тонких пленок, несмотря на многообразие их назначения и конструктивного оформления, состоят из следующих основных элементов: источника генерации потока частиц осаждаемого материала; вакуумной системы, обеспечивающей требуемые условия для проведения технологического процесса; транспортно-позиционирующих устройств, обеспечивающих ввод подложек в зону нанесения пленок и ориентирование обрабатываемых поверхностей относительно потока частиц наносимого материала.

Типовая установка нанесения тонких пленок в вакууме (рис. 7) имеет каркас 11, на котором смонтированы вакуумная рабочая камера 5 с источником 1 наносимого материала, подложкодержателем 4 с подложками 3, а также вакуумная откачная система 10. Системы электропитания и управления установкой, как правило, расположены в отдельных шкафах (стойках).

Рабочая вакуумная камера 5 представляет собой цилиндрический колпак из нержавеющей стали, который подъемным механизмом может подниматься вверх для доступа к подколпачным устройствам. В опущенном состоянии колпак герметизируется на базовой плите 9 уплотняющей кольцевой прокладкой 8 из вакуумной резины. Кран 6 служит для напуска в камеру воздуха, а датчик 7 — для измерения вакуума в ее рабочем пространстве. Над источником 1, генери-

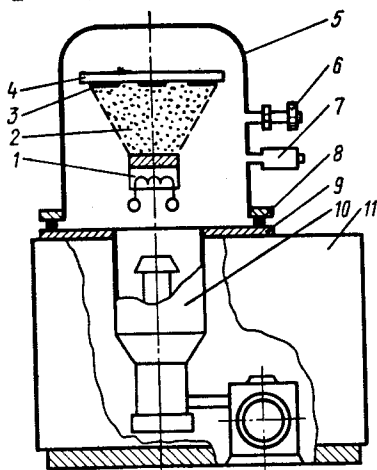


Рис. 7. Схема установки для нанесения пленок:

1 — источник потока наносимых частиц, 2 — поток частиц, 3 — подложка, 4 — подложкодержатель, 5 — рабочая вакуумная камера, 6 — кран напуска воздуха, 7 — датчик изменения вакуума, 8 — кольцевая резиновая прокладка, 9 — базовая плита, 10 — вакуумная откачная система, 11 — каркас

рующим поток 2 частиц наносимого материала, расположен подложкодержатель 4, на котором крепятся подложки 3 с необходимой ориентацией. Вакуумная система крепится к отверстию в базовой плите и предназначена для откачки рабочей камеры.

Процесс нанесения тонких пленок в вакууме состоит из следующих основных операций:

установки и закрепления подлежащих обработке подложек на подложкодержателе при поднятом колпаке;

закрытии (герметизации) рабочей камеры и откачки ее до требуемого вакуума;

включении источника, создающего атомарный (молекулярный) поток осаждаемого вещества;

нанесении пленки определенной толщины при постоянно работающих источнике потока частиц и вакуумной системе;

выключении источника потока частиц, охлаждении подложек и напуске воздуха в рабочую камеру до атмосферного давления;

подъеме колпака и съеме обработанных подложек с подложкодержателя.

В некоторых случаях выполняют дополнительные операции (например, предварительный нагрев подложек). Эффективность процесса характеризуется его производительностью, чистотой и равномерностью толщины наносимой пленки.

При нанесении тонких пленок используют два метода генерации потока частиц в вакууме: термическое испарение и ионное распыление (рис. 8).

Метод термического испарения основан на нагреве веществ в специальных испарителях до температуры, при которой начинается заметный процесс испарения, и последующей конденсации паров вещества в виде тонких пленок на обрабатываемых поверхностях, расположенных на некотором расстоянии от испарителя. Важным фактором, определяющим эксплуатационные особеннос-

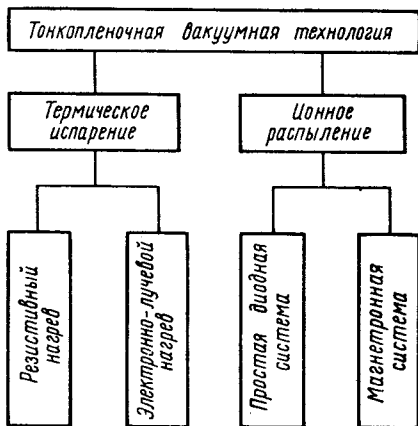


Рис. 8. Классификация основных технологических способов нанесения пленок в вакууме

ти и конструкцию установок термического испарения, является способ нагрева испаряемых материалов: резистивный (омический) или электронно-лучевой.

Метод ионного распыления основан на бомбардировке мишени, изготовленной из осаждаемого материала, быстрыми частицами (обычно положительными ионами аргона). Выбитые из мишени в результате бомбардировки частицы образуют поток наносимого материала, который осаждается в виде тонкой пленки на подложках, расположенных на некотором расстоянии от мишени.

Важным фактором, определяющим эксплуатационные особенности и конструкции установок ионного распыления, является способ генерации ионов, бомбардирующих мишень. В соответствии с этим установки ионного распыления оснащаются простой двухэлектродной или магнетронной системой.

Выбор того или иного метода нанесения пленки зависит от многих факторов, основным из которых являются природа и сортамент используемого материала, вид и состояние обрабатываемых поверхностей, требования к чистоте и толщине пленки, производительность процесса.

Для понимания физических явлений, происходящих при нанесении тонких пленок в вакууме, необходимо знать, что процесс роста пленки на подложке состоит из двух этапов: начального и завершающего. Рассмотрим, как взаимодействуют наносимые частицы в вакуумном пространстве и на подложке (рис. 9).

Покинувшие поверхность источника частицы 1 вещества движутся через вакуумное (разреженное) пространство с большими скоростями (порядка сотен и даже тысяч метров в секунду) к подложке 6 и достигают ее поверхности, отдавая ей при столкновении часть своей энергии (например, частица 8). Доля передаваемой энергии тем меньше, чем выше температура подложки. Сохранив при этом некоторый избыток энергии, частица

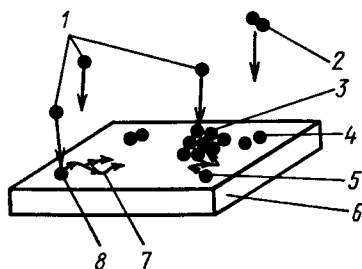


Рис. 9. Взаимодействие осаждаемых частиц с подложкой: 1 — частицы в вакуумном пространстве, 2 — дуплет частиц в вакуумном пространстве, 3 — центр кристаллизации, 4 — адсорбированный дуплет частиц, 5 — рост кристаллита за счет мигрирующих частиц, 6 — подложка, 7 — поверхностная миграция частиц, 8 — адсорбированная частица

8 вещества способна перемещаться (мигрировать) по поверхности подложки, как это показано ломаными стрелками 7.

При миграции по поверхности частица постепенно теряет избыток своей энергии, стремясь к тепловому равновесию с подложкой, и при этом может произойти следующее. Если на пути движения частица потеряет избыток, своей энергии, она фиксируется на подложке (конденсируется). Встретив же на пути движения другую мигрирующую частицу (или группу частиц), она вступит с ней в сильную связь (металлическую), создав адсорбированный дуплет 4. При достаточно крупном объединении такие частицы полностью теряют способность мигрировать и фиксируются на подложке, становясь центром кристаллизации 3.

Вокруг отдельных центров кристаллизации происходит рост кристаллитов, которые впоследствии срастаются и образуют сплошную пленку. Рост кристаллитов происходит как за счет мигрирующих по поверхности частиц 5, так и в результате непосредственного осаждения частиц 1 на поверхность кристаллитов. Возможно также образование дуплетов 2 в вакуумном пространстве при столкновении двух частиц, которые в конечном итоге адсорбируются на подложке.

Различные загрязнения в виде пылинок и следов органических веществ существенно искажают процесс роста пленок и ухудшают их качество.

Образованием сплошной пленки заканчивается начальный этап процесса. Так как с этого момента качество поверхности подложки перестает влиять на свойства наносимой пленки, начальный этап имеет решающее значение в их формировании. На завершающем этапе происходит рост пленки до необходимой толщины.

При прочих неизменных условиях рост температуры подложки увеличивает энергию, т. е. подвижность адсорбированных молекул, что повышает вероятность встречи мигрирующих молекул и приводит к формированию пленки крупнокристаллической структуры. Кроме того, при увеличении плотности падающего пучка повышается вероятность образования дуплетов и даже многоатомных групп. В то же время рост количества центров кристаллизации способствует образованию пленки мелкокристаллической структуры.

Эти факторы обуславливают необходимость стабильного поддержания температуры подложек и скорости испарения материала.

§ 3. ВАКУУМ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Технология нанесения тонких пленок и создание вакуума в рабочих камерах установок базируются на молекулярно-кинетической теории строения вещества.

Вещества в природе состоят из мельчайших частиц — молекул, которые могут существовать самостоятельно и обладают всеми свойствами данного вещества. Молекулы состоят из нескольких более мелких частиц — атомов, а могут быть и одноатомными (например, молекулы инертных газов).

Наблюдения за поведением любого вещества показывают, что его молекулы (атомы) находятся в постоянном беспорядочном движении независимо от того, в твердом, жидком или газообразном состоянии оно находится. Это движение обусловлено внутренней кинетической энергией вещества, которая связана с его температурой. Поэтому беспорядочное движение, в котором находятся молекулы, называют *тепловым*, а теорию, изучающую тепловое движение молекул, — *кинетической теорией материи*.

Молекулы вещества, находящиеся в непрерывном хаотическом движении, связаны между собой силами сцепления, от значения которых зависит твердое, жидкое или газообразное состояние вещества.

Тепловое движение частиц твердого тела носит колебательный характер: они колеблются около среднего положения с различными амплитудами и в разных плоскостях. Колебательный характер теплового движения частиц твердого тела обусловлен тем, что между ними имеются прочные связи, позволяющие ему сохранять объем и форму.

Если твердое тело подвергнуть нагреву, то при некоторой температуре (температуре плавления) оно начнет размягчаться и превращаться в жидкость. Тепловое движение молекул жидкости носит в основном поступательный характер с различными скоростями и в разных направлениях. Это объясняется меньшей, чем в твердом теле, прочностью связей между молекулами жидкости: она способна сохранять только объем, но не форму.

При дальнейшем нагревании жидкость начинает испаряться, превращаясь в пар, т. е. переходит в газообразное состояние. Тепловое движение молекул газообразного вещества имеет только поступательный характер с очень слабым взаимодействием между ними, особенно при низких давлениях. Благодаря тепловому движению при наличии лишь слабой связи между молекулами газообразное вещество не способно самостоятельно сохранять ни форму, ни объем, а всегда занимает весь предоставленный ему объем.

Постоянным хаотическим тепловым движением молекул газа легко объясняются многие явления, с которыми приходится сталкиваться при изучении как процессов нанесения тонких пленок, так и процессов, происходящих в вакуумном пространстве.

Разреженное состояние газа, т. е. состояние, при котором давление газа в некотором замкнутом герметичном объеме ниже атмосферного, называют *вакуумом*. "Вакуум" в переводе с латинского означает пустота.

Вакуумная техника занимает важное место в производстве пленочных структур ИМС. Для создания вакуума в рабочей камере из нее должны быть откачаны газы. Идеальный вакуум не может быть достигнут, и в откачанных рабочих камерах технологических установок всегда присутствует некоторое количество остаточных газов, чем и определяется давление в откачанной камере (глубина, или степень вакуума).

В Международной системе единиц (СИ) единицей давления является паскаль (Па), который равен 1Н на 1 м² (Н/м²). Большое распространение в вакуумной технике имеет внесистемная единица — миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), соответствующая давлению столбика ртути 1 мм при 0° С.

Между этими единицами давления существуют следующие соотношения: 1 мм рт. ст. = 133,3 Па или 1 Па = 7,5 × 10⁻³ мм рт. ст. В дальнейшем иногда наряду с паскалями в скобках будут даны значения давления в миллиметрах ртутного столба, так как некоторые приборы проградуированы в них. Отметим, что основные единицы СИ, которыми придется пользоваться, выражаются: длина — в метрах (м); масса — в килограммах (кг); время — в секундах (с); температура — в градусах Кельвина (К); сила тока — в амперах (А).

Как уже отмечалось, согласно молекулярно-кинетической теории все молекулы (атомы) газов находятся в постоянном беспорядочном тепловом движении. Условно можно выделить путь отдельной молекулы (рис. 10). Хаотичное движение молекул объясняется их взаимными столкновениями. В результате этого путь молекул в пространстве при их тепловом движении представляет собой ломаную кривую, состоящую из отдельных прямолинейных участков. Эти участки соответ-

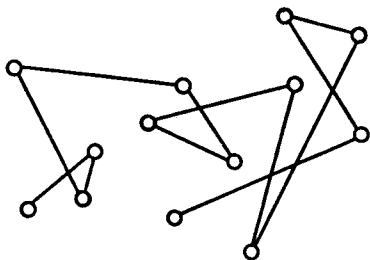


Рис. 10. Тепловое движение молекул в разреженном газе

вуют перемещению молекулы без соударений с другими молекулами. Каждый излом пути, обозначенный на рис. 10 кружочком, является результатом упругого столкновения рассматриваемой молекулы с другой молекулой.

Для простоты будем считать, что после столкновения молекула может с равной вероятностью полететь в любую сторону независимо от своего первоначального направления движения. Путь, проходимый молекулой газа между очередными столкновениями, не может быть одинаковым из-за хаотичности теплового движения молекул. Поэтому говорят о среднем пути, совершаемом молекулой газа между двумя очередными столкновениями.

Средняя длина прямолинейных промежутков, из которых складывается зигзагообразный путь молекул газа, называется *средней длиной свободного пути молекул*, обозначается λ и является одним из важнейших понятий вакуумной техники.

Очевидно, что значение λ зависит от концентрации молекул. При атмосферном давлении, когда концентрация молекул высока, в результате теплового движения они очень часто сталкиваются друг с другом. Чем ниже концентрация, т. е. чем меньше молекул содержится в единице объема газа, тем реже их взаимные столкновения и больше λ . Так как концентрация молекул в объеме пропорциональна давлению p , значение λ обратно пропорционально давлению газа.

Ниже приведена средняя длина свободного пути молекул воздуха при 20°C и различных давлениях, которую можно рассчитать по формуле

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-1} / p . \quad (3)$$

p , Па (мм рт. ст.)	10^5 (760)	10^1 (10^{-1})	10^0 (10^{-2})	10^{-1} (10^{-3})	10^{-2} (10^{-4})	10^{-3} (10^{-5})	10^{-4} (10^{-6})
λ , см	$7,2 \cdot 10^{-6}$	0,055	0,55	5,5	55	550	5500

Из формулы (3) и табл. 1 следует, что по мере удаления воздуха из объема, т. е. уменьшении давления, λ увеличивается. Причем может наступить такой момент, когда взаимные столкновения молекул практически прекратятся и будут происходить лишь их столкновения со стенками сосуда (камеры).

Чтобы определить вид столкновений молекул газа, необходимо определить соотношение между средней длиной свободного пути молекул λ и характерным размером d — диаметром сосудов цилиндрической формы и длиной меньшей стороны

сосудов прямоугольной формы (квадратная камера). Отношение λ/d является критерием разделения вакуума на низкий, высокий и средний.

При низком вакууме средняя длина свободного пути молекул λ значительно меньше характерного размера сосуда d , т. е. $\lambda \ll d$. Молекулы при этом испытывают преимущественно постоянные столкновения друг с другом, вследствие чего их путь представляет собой ломаные линии (рис. 11, а). При столкновении со стенками сосуда молекулы газа удерживаются на них, т. е. адсорбируются.

Процесс поглощения газов или паров поверхностью твердого тела с образованием на ней пленки газов толщиной в одну или несколько молекул называют *адсорбцией*. Адсорбированные на стенках сосуда молекулы газа непрерывно с них испаряются, но, так как их λ очень мала, они сразу же сталкиваются с другими молекулами газа. Причем молекулы, получившие в результате столкновения направление своего движения на стенку, вновь адсорбируются. Это значит, что в условиях низкого вакуума на стенках сосуда постоянно имеется слой адсорбированных молекул.

Высокий вакуум характеризуется тем, что средняя длина свободного пути молекул λ значительно больше характерного размера сосуда d , т. е. $\lambda \gg d$ (рис. 11, б). При высоком вакууме в сильно разреженном газе хотя и сохраняется хаотический характер движения молекул, но взаимодействие между ними из-за малого количества практически исчезает и они движутся прямолинейно в пределах предоставленного

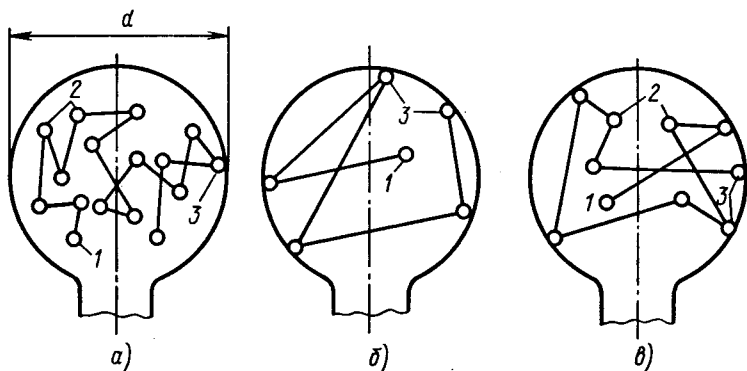


Рис. 11. Путь молекул газа в замкнутом сосуде в условиях низкого $\lambda \ll d$ (а), высокого $\lambda \gg d$ (б) и среднего $\lambda \approx d$ (в) вакуума: 1 — исходное положение молекулы, 2 — места столкновений молекул с другими молекулами, 3 — места удара молекул о стенку сосуда

объема, сталкиваясь в основном со стенками сосуда. Ударившись о стенку сосуда и пробыв очень малое время в адсорбированном состоянии, молекулы отрываются и летят в случайных направлениях. Поэтому некоторые части стенок сосуда могут быть свободны от слоя адсорбированных молекул газа.

Средний вакуум характеризуется тем, что средняя длина свободного пути молекул λ приблизительно равна характерному размеру сосуда d , т. е. $\lambda \approx d$ (рис. 11, в). При этом возможны траектории движения молекул, частично присущие условиям низкого, а частично высокого вакуума.

§ 4. ВЛИЯНИЕ ВАКУУМА НА ПРОЦЕСС НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК

Процессы, происходящие при нанесении тонких пленок, во многом определяются степенью вакуума в рабочих камерах, характеризуемой средней длиной свободного пути частиц осаждаемого вещества. Для анализа процессов, происходящих при нанесении тонких пленок, большое значение имеет соотношение $\lambda_v/d_{ип}$. При этом под λ_v понимают длину свободного пути частиц потока наносимого вещества, вышедшего из источника, а под $d_{ип}$ — расстояние от источника до подложки.

Характер движения частиц наносимого вещества в условиях среднего и высокого вакуума можно пояснить следующим

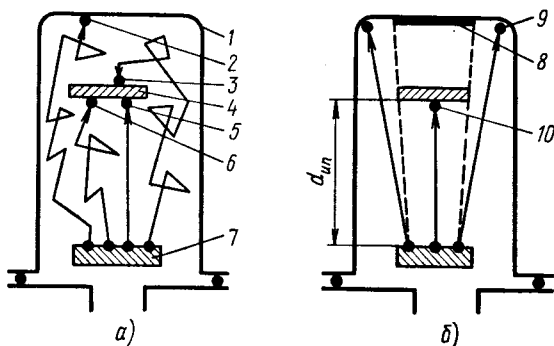


Рис. 12. Движение частиц наносимого вещества в условиях среднего (а) и высокого (б) вакуума: 1 — стеклянная камера, 2, 9 — частицы, осажденные на стенку камеры, 3 — частица, осажденная на обратную сторону подложки, 4 — подложка, 5, 10 — частицы, осажденные на лицевую сторону подложки без столкновений, 6 — частица, осажденная на лицевую сторону подложки после столкновения, 7 — источник потока частиц, 8 — тень от подложки (экрана)

опытом (рис. 12, а, б). В нижнюю часть стеклянной камеры 1, в которой поддерживается вакуум, помещают источник 7 потока частиц наносимого вещества, а в верхнюю часть устанавливают подложку 4.

При нанесении пленок в среднем вакууме (рис. 12, а) частицы осаждаемого вещества имеют различный характер движения. Часть из них при движении по направлению к подложке претерпевает большое количество столкновений с молекулами газа, и траектория их движения имеет вид ломаной линии. При этом полностью нарушается первоначальная ориентировка движения частиц. В результате некоторые частицы 6 после ряда столкновений попадают на подложку. Часть частиц 5 попадает на нее без столкновений. Некоторые частицы 2 не попадают на подложку, а конденсируются на стенках камеры 1, образуя равномерное пленочное покрытие. Соударение отдельных частиц 3 может привести даже к осаждению пленки на обратной стороне подложки 4.

При нанесении пленок в высоком вакууме (рис. 12, б) частицы осаждаемого вещества летят независимо друг от друга по прямолинейным траекториям без взаимных столкновений и столкновений с молекулами газа, не изменяя своего направления, и конденсируются (частицы 9 и 10) на стенках камеры 1 и поверхности подложки 4.

Условия вакуума влияют на рост пленок следующим образом.

Во-первых, если вакуум не достаточно высокий, заметная часть частиц, летящих из источника потока, встречает молекулы остаточного газа и в результате столкновения с ними рассеивается, т. е. теряет первоначальное направление своего движения и не попадает на подложку. Это существенно снижает скорость нанесения пленки.

Во-вторых, остаточные газы в рабочей камере, поглощаемые растущей на подложке пленкой в процессе ее роста, вступают в химические реакции с наносимым веществом (хемосорбируются), что ухудшает электрофизические параметры пленки (повышается ее сопротивление, уменьшается адгезия, возникают внутренние напряжения и др.).

Рассмотрим взаимодействие атомов и молекул осаждаемого вещества и остаточного газа на подложке в вакууме. На подложку падает два разных потока: полезный — атомы осаждаемого вещества и фоновый — молекулы остаточных газов. Процессы, протекающие при одновременном пребывании на подложке молекул газа и атомов осаждаемого вещества, обусловлены их физической адсорбцией и хемосорбцией. Адсорбция молекулы газа на подложке, замуровывание ее атомами

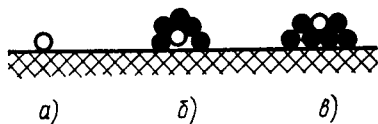


Рис. 13. Взаимодействия молекул газа с атомами осаждаемого вещества:

а — молекула газа, адсорбированная на подложке, *б* — молекула газа, замурованная ато-

мами осажденного вещества, *в* — молекула газа, хемосорбированная пленкой осаждаемого вещества

осаждаемого вещества и молекула газа, хемосорбированная пленкой, показаны на рис. 13, *а–в*.

Таким образом, чем ниже вакуум и чем больше в остаточной атмосфере вакуумной камеры примеси активных газов, тем сильнее их отрицательное влияние на качество наносимых пленок, а также на производительность процесса.

§ 5. ПОЛУЧЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При изготовлении тонкопленочных структур ИМС на конечном этапе получают пленочные резисторы, конденсаторы, межсоединения и контактные площадки определенных размеров, взаимного расположения и различной конфигурации, что необходимо для выполнения этими элементами заданных функций. Создание по заданному рисунку пленочных элементов ИМС требуемой конфигурации производят методом свободной маски или фотолитографии, выбор которого зависит от способа нанесения и свойств материала тонкой пленки, требований точности, плотности размещения элементов, воспроизводимости процесса, его производительности и других факторов.

Метод свободной маски в основном используют в производстве пленочных и гибридных ИМС при нанесении пленок термическим испарением в вакууме. Так как формирование рисунков пленочных структур методом свободной маски осуществляются при нанесении пленок в вакуумной установке оператором, остановимся на нем подробнее.

Этот метод основан на экранировании подложки, специально изготовленной из тонкой металлической фольги маской-трафаретом с прорезями и отверстиями, очертания и расположение которых соответствуют требуемой конфигурации пленочных элементов ИМС. Маску-трафарет называют свободной (съёмной) потому, что ее изготавливают отдельно. Перед нанесением пленочных элементов маску-трафарет закрепляют в маскодержателе, обеспечивающем ее плотный прижим и фиксированное положение относительно подложки. При нанесении пленки испаряемое вещество осаждается на подложке только в местах, не закрытых маской.

Маски-трафареты для формирования пассивных элементов ИМС должны иметь точность размеров прорезей до ± 5 мкм при их ширине до 100 мкм, быть достаточно прочными и упругими при толщине до 100 мкм, обладать высокой чистотой поверхности и плоскостностью (это обеспечивает их плотное прилегание к подложке), а также хорошей нагревостойкостью в условиях вакуума (не должны деформироваться, допускать газовыделение и испаряться). Этим требованиям отвечают медные сплавы, нержавеющая сталь, молибден и некоторые другие материалы. Преимущественно применяют бериллиевую бронзу.

Металлические маски-трафареты изготавливают механическим фрезерованием, химическим и электролитическим травлением и фотолитографией.

Механическим фрезерованием изготавливают металлические маски-трафареты с крупным рисунком (не менее 0,5–1 мм), а химическим и электролитическим травлением — с рисунками меньших размеров. Фольговые маски-трафареты позволяют получать узкие линии простых по конфигурации рисунков с зазорами шириной не менее толщины фольги (30 – 50 мкм).

Поскольку при изготовлении пленочных ИМС наносят несколько слоев различной конфигурации, необходимо совмещать рисунок маски-трафарета с рисунком предыдущего слоя, нанесенного на подложку.

Сложность фиксации подложки в подложкодержателе состоит в том, что допустимая погрешность совмещения с учетом нагрева подложки и маски до 300° С не должна превышать сотых долей миллиметра. Один из вариантов совмещения маски-трафарета с подложкодержателем показан на рис. 14, а.

На массивное основание 8 столика 2 (рис. 14, б) укладывают подложку 3 обратной стороной. Массивное основание служит для выравнивания температуры по всей подложке при нанесении пленки. Фиксируют подложку двумя упорами: жестким 9, куда вставляется ее базовый угол, и подпружиненным 10. Затем столик с подложкой в перевернутом положении (рис. 14, в) укладывают на выступы 11 держателя 7 столика, располагая базовый угол столика между двух регулируемых винтов 16, а противоположный при этом оказывается между третьим винтом 12 и подпружиненным шариковым упором 14 с плоской пружиной 13. На держателе столика имеются два штыря 15 с точным базовым расстоянием A . По периферии держателя столика расположены резьбовые отверстия 17.

Маска-трафарет 6 (рис. 14, г) имеет два базирующих отверстия 18 и, кроме того, по ее периферии расположены отверстия 20 для крепления к держателю столика. Рабочее поле 19 мас-

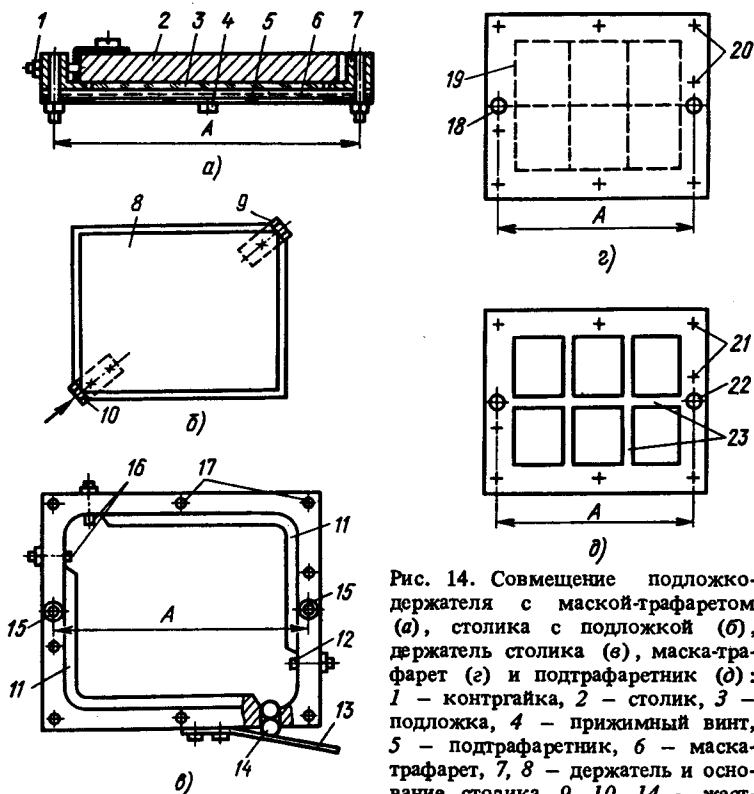


Рис. 14. Совмещение подложко-держателя с маской-трафаретом (а), столика с подложкой (б), держатель столика (в), маска-трафарет (г) и подтрафаретник (д): 1 — контргайка, 2 — столик, 3 — подложка, 4 — прижимный винт, 5 — подтрафаретник, 6 — маска-трафарет, 7, 8 — держатель и основание столика, 9, 10, 14 — жест-

кий, подпружиненный и шариковый упоры, 11 — выступы держателя, 12, 16 — регулируемые винты, 13 — плоская пружина, 15 — штырь, 17, 18 — резьбовые и базировочные отверстия, 19 — рабочее поле, 20, 21, 22 — отверстия, 23 — перегородки

ки-трафарета и границы будущих ИМС показаны на рис. 14, г штриховыми линиями.

Столик с подложкой устанавливают в держатель и укладывают на штыри 15 маску-трафарет и подтрафаретник. Подтрафаретник (рис. 14, д) служит для придания маске-трафарету жесткости и выполняется в виде относительно толстой пластины-решетки, перегородки 23 которой расположены по границам будущих ИМС (плат) групповой маски. По его периферии также имеются отверстия 21 для закрепления на держателе с фиксацией по базировочным отверстиям 22.

Для совмещения подложки с соответствующей маской-трафаретом служат регулируемые винты 16 и 12, которые фиксируют контргайками 1, предварительно добившись с

помощью инструментального микроскопа правильного положения рисунка маски-трафарета относительно кромок подложки. Чтобы маска-трафарет при нагреве в процессе нанесения пленок не деформировалась, плотно затягивают только те винты 4 (рис. 14, а), которые расположены около базового угла, а остальные не доворачивают на 0,5 — 1 виток резьбы, что позволяет маске и подтрафаретнику свободно расширяться.

После этого сборку устанавливают на рабочую позицию установки и наносят пленку. Следует отметить необходимость наиболее плотного прижатия маски-трафарета к подложке во избежание появления зоны размытости — подпыления (рис. 15), что приводит к нарушению геометрических размеров и соответственно параметров тонкопленочных элементов.

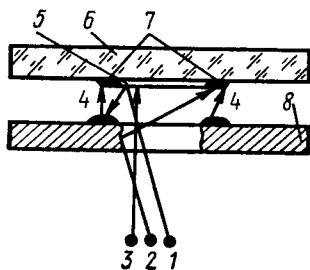
Достоинствами этого метода является то, что маска-трафарет может быть использована многократно, и конфигурацию пленочных элементов получают непосредственно в процессе нанесения пленок, так как поток наносимого вещества осаждается только на местах подложки, не закрытых маской-трафаретом. Маска-трафарет является многократным съемным инструментом.

Недостаток метода состоит в том, что при многократном использовании маски-трафарета в ней зарастают прорезы, которые приходится очищать от осаждаемого материала, т. е. восстанавливать их размеры. При этом чем тоньше прорезы в масках-трафаретах, тем быстрее они зарастают при нанесении пленок и теряют свои размеры. Недостатком является и то, что этот метод не позволяет получать элементы ИМС замкнутой конфигурации.

Основное ограничение метода свободной маски — невысокая точность топологии элементов. Это объясняется погрешностями изготовления масок-трафаретов, неплотностью их прижатия к подложкам и температурными взаимодействиями в процессе осаждения пленки.

Рис. 15. Подпыление при нанесении пленок с использованием свободной маски-трафарета:

1 — траектория атомов, отраженных от подложки и осевших на тыльной стороне маски-трафарета, 2 — траектория атомов, отраженных от боковых стенок окна маски-трафарета, 3 — прямое осаждение атомов, 4 — траектория атомов, отраженных с тыльной стороны маски-трафарета, 5 — требуемая конфигурация осаждаемой пленки, 6 — подложка, 7 — зона размытости, 8 — свободная маска-трафарет



Несмотря на недостатки, метод свободной маски во многих случаях незаменим в технологии тонкопленочных ИМС, так как исключается действие травильных растворов на пленки, что неизбежно при фотолитографии, и, кроме того, наиболее производителен и экономичен.

Метод фотолитографии позволяет получать точные размеры элементов и поэтому применяется в основном в производстве полупроводниковых ИМС высокой степени интеграции, т. е. сложных тонкопленочных структур с большим количеством элементов.

При фотолитографии с помощью фотохимических процессов на поверхности подложек по заданному рисунку получают конфигурацию тонких слоев. При этом на поверхность, подлежащую локальной обработке, наносят слой специального материала — фоторезиста, способного изменять свои свойства под воздействием светового облучения. Основным рабочим инструментом фотолитографии является фотошаблон, представляющий собой плоскую стеклянную пластину, на которую нанесен требуемый рисунок в виде прозрачных и непрозрачных участков. Слой фоторезиста облучают через фотошаблон и химически обрабатывают — проявляют. В результате этого с отдельных участков поверхности фоторезист удаляется, а оставшийся используется как маска (фотомаска).

Фотолитографическая обработка состоит в следующем. При изготовлении тонкопленочного резистора (рис. 16, а) на исходную подложку 5 вначале наносят сплошную резистивную пленку 4, а поверх нее — тонкий слой фоторезиста 3, который сушат для удаления растворителя, и экспонируют ультрафиолетовым излучением 1 через фотошаблон 2, который совмещают с подложкой 5. Затем фоторезист проявляют, и его незащищенные участки вымываются до слоя резистивной пленки

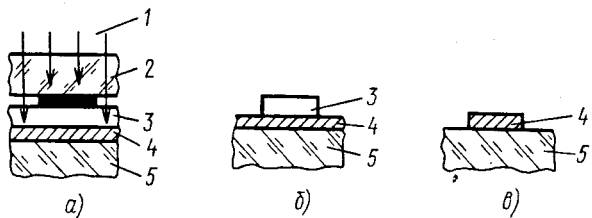


Рис. 16. Схема метода фотолитографии:

а — экспонирование, б — проявление позитивного фоторезиста, в — травление резистивной пленки и удаление фотомаски; 1 — направление ультрафиолетового излучения, 2 — фотошаблон, 3 — слой фоторезиста, 4 — резистивная пленка, 5 — подложка

(рис. 16, б). Далее проводят селективное (избирательное) травление незащищенных фоторезистом мест резистивной пленки (рис. 16, в), в результате которого получают требуемый рельефный рисунок резистивной пленки 4. Последней операцией фотолитографии является удаление оставшегося слоя фоторезиста с подложки и получение готового резистора.

Фотошаблоны выполняют из стекла, прозрачного для ультрафиолетового излучения с длиной волны 300 — 500 нм. Важной технологической операцией при изготовлении фотошаблонов является металлизация заготовок фотошаблонов для создания непрозрачного тонкого сплошного слоя, обладающего высокой адгезией к поверхности стеклянной подложки, который не должен иметь точечных дефектов в виде проколов и должен быть стойким к истиранию при совмещении с подложкой (выдерживать 50 — 200 операций совмещения).

Этим требованиям удовлетворяют непрозрачные пленки хрома, а также пленки на основе оксида железа, полупрозрачные для видимого и непрозрачные для ультрафиолетового излучения. Фотошаблоны на основе оксида железа называют *транспарантными*. При толщине металлизационной пленки 0,08 — 0,15 мкм обеспечивает малая плотность дефектов рабочих фотошаблонов. Тонкопленочные хромовые покрытия наносят на заготовки фотошаблонов термовакuumным методом, а пленки оксида железа как термовакuumным, так и пиролитическим.

К О Н Т Р О Л Ь Н Ы Е В О П Р О С Ы

1. Какие типы ИМС и их тонкопленочные элементы вы знаете?
2. Какие материалы применяют для изготовления подложек для пленочных, гибридных и полупроводниковых ИМС?
3. Каков принцип действия установок для нанесения тонких пленок?
4. Как происходит рост тонкой пленки на подложке?
5. Какими давлениями и средней длиной свободного пути молекул газа характеризуются низкий, средний и высокий вакуум?
6. Как получают рисунки тонкопленочных слоев ИМС?

Г Л А В А В Т О Р А Я НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

§ 6. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Все вещества в зависимости от температуры нагрева могут находиться в одном из трех фазовых (агрегатных) состояний: твердом, жидком или газообразном (парообразном). Испарение, т. е. переход вещества в парообразное состояние, проис-

ходит, когда с повышением температуры средняя колебательная энергия его частиц возрастает настолько, что становится выше энергии связи с другими частицами и они покидают поверхность (испаряются) и распространяются в свободном пространстве.

Условной, практически установленной температурой испарения считается температура, при которой давление насыщенного пара вещества составляет приблизительно 1,3 Па.

Температуры плавления и испарения наиболее важных элементов приведены в табл. 2. Из этой таблицы видно, что условная температура испарения большинства элементов выше их температуры плавления, т. е. испарение происходит из жидкого состояния. Некоторые вещества имеют условную температуру испарения ниже температуры плавления, т. е. они достаточно интенсивно испаряются из твердого состояния. Процесс перехода вещества из твердого состояния в парообразное, минуя жидкую фазу, называют *сублимацией (или возгонкой)*.

Скорость испарения, т. е. количество вещества (в граммах), покидающее 1 см² свободной поверхности в 1 с при условной температуре T_y , рассчитывают по формуле

$$\nu_{\text{и}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{M/T_y}, \quad (4)$$

где M — молекулярная масса, г/моль.

По этой формуле можно определить, например, какова скорость испарения алюминия, имеющего $M = 27$ и $T_y = 1423$:

Т а б л и ц а 2. Температуры плавления и испарения элементов

Элемент	Атомная масса	$t_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	$T_y, ^\circ\text{C}$	Рекомендуемые материалы испарителя	
				проволоки, ленты	тигля
1	2	3	4	5	6
Ag	107,9	961	1047	Mo, Ta	Mo, C
Al	27	660	1150	W	C, BN
Au	197	1063	1465	W, Mo	Mo, C
Cr*	52	1800	1205	W, Ta	
Cu	63,5	1083	1273	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta	W, C, Al ₂ O ₃
Mg*	24,3	651	443	W, Mo, Ta, Ni	FeC
Mn	54,9	1244	980	W, Mo, Ta	Al ₂ O ₃
Mo**	95,9	2622	2533	—	—
Ni	58,7	1455	1510	W	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂

1	2	3	4	5	6
Pt	195	1774	2090	W	ZrO ₂
Si	28	1415	1342	—	BeO, ZrO ₂
Ta**	181	2996	3070	—	—
Ti*	47,9	1725	1546	W, Ta	—
W**	183,9	3382	3309	—	—

* Испаряется из твердого состояния (сублимируется).

** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

$$\nu_{\text{и}} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{27/1423} \approx 9 \cdot 10^{-5} \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}.$$

Скорость испарения большинства элементов при T_y составляет 10^{-4} г/(см²·с). Для получения приемлемых скоростей роста пленки, а также экономного расходования материала (нередко дорогостоящего) следует создавать условия движения частиц испаряемого вещества преимущественно по направлению к подложке. При этом необходим достаточно глубокий вакуум, при котором исключаются столкновения молекул остаточного газа с молекулами вещества и рассеивание их потока на пути к подложке.

Поток испаренного вещества, состоящий из молекул (атомов), не претерпевающих на своем пути столкновений и рассеяний и движущихся вследствие этого прямолинейно, называют *молекулярным потоком*. Для определения условий существования молекулярного потока удобнее характеризовать степень вакуума не давлением остаточного газа, а средней длиной свободного пробега его молекул.

Из формулы (3) следует, что уже при давлении $p = 10^{-2}$ Па средняя длина свободного пробега молекул λ составляет 50 см, что превышает реальное расстояние от испарителя до подложки (обычно не более 30 см). Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление порядка $10^{-3} - 10^{-5}$ Па.

Кроме того, необходимо обеспечивать равномерность распределения толщины пленки на подложке, что является одним из основных ее параметров. Толщина пленки в данной точке подложки определяется количеством частиц, достигающих ее в единицу времени. Если бы поток наносимых частиц был одинаков на всю поверхность подложки, пленка получалась бы одинаковой толщины. Однако площадь испарителей веществ

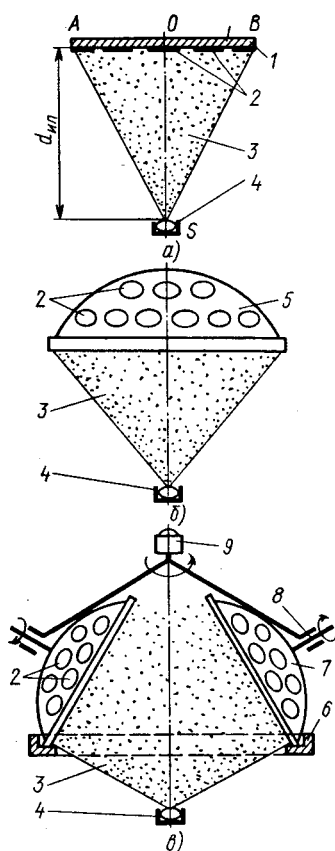


Рис. 17. Схемы осаждения пленок из точечного источника на плоский (а) и сферический подложкодержатели (б) и на планетарный подложкодержатель с двумя направлениями вращения (в):

1, 5, 7 — плоский, сферический и планетарный подложкодержатели, 2 — подложки, 3 — поток осаждаемых частиц, 4 — точечный источник потока осаждаемых частиц, 6 — кольцо, 8 — ось подложкодержателя, 9 — приводная вращающаяся ось

подложкодержатель может вращаться вокруг собственной оси 8 при обкатывании по кольцу 6. Так осуществляется планетарное движение подложек. Планетарные карусели стоят довольно

во много раз меньше площади подложкодержателей (поэтому их называют точечными источниками). В результате добиться равномерности потока невозможно. Как видно из рис. 17, а, скорость нанесения пленки будет неодинакова в точке O и в точках A и B: чем дальше от оси OS эти точки, тем ниже скорость нанесения пленки и тем меньше ее толщина за данное время нанесения. При плоском подложкодержателе неравномерность толщины пленки составляет $\pm 20\%$.

Наиболее простым способом снижения неравномерности распределения пленки по толщине является увеличение расстояния $d_{ин}$. Однако это уменьшает скорость конденсации пленки, что отрицательно сказывается на ее свойствах. Максимально возможное расстояние $d_{ин}$ ограничено размерами рабочей камеры установки.

На практике применяют более сложные способы, одним из которых является придание подложкодержателю сферической формы (рис. 17, б).

Неравномерность толщины пленки снижается при этом до $\pm 10\%$. Если этого недостаточно, используют систему с двойным вращением, так называемую планетарную карусель (рис. 17, в), состоящую из приводной вращающейся оси 9, на которой установлены три подложкодержателя 7. Каждый

дорого, однако при их использовании неравномерность пленок по толщине составляет $\pm (3 \div 4) \%$.

Для проверки неравномерности толщины нанесенных пленок в пяти точках на пластине — в центре и по краям взаимно перпендикулярных диаметров — измеряют с помощью микроскопа МИИ-4 толщину пленки $d_{\text{п}}$. Выбирают из полученных значений толщины максимальное $d_{\text{пmax}}$ и минимальное $d_{\text{пmin}}$ и вычисляют (%) неравномерность (отклонение толщины от среднего значения) по формуле

$$\pm B = \frac{d_{\text{пmax}} - d_{\text{пmin}}}{2(d_{\text{пmax}} + d_{\text{пmin}})} \cdot 100 \% . \quad (5)$$

Рассмотрим пример расчета неравномерности толщины пленки. Получены замеры в пяти точках (нм): 1260, 1255, 1290, 1280, 1265. Из этого ряда выберем $d_{\text{пmax}} = 1290$ и $d_{\text{пmin}} = 1255$ и вычислим неравномерность по формуле (5):

$$\pm B = \frac{1290 - 1255}{2(1290 + 1255)} \cdot 100 \% = \pm 2,7 \% .$$

Процесс испарения и качество нанесенных пленок в значительной мере определяются типом и конструкцией испарителей, которые могут иметь резистивный или электронно-лучевой нагрев. Выбор типа испарителя зависит от вида испаряемого материала, его агрегатного состояния и температуры в процессе испарения, а также других факторов.

§ 7. ИСПАРИТЕЛИ С РЕЗИСТИВНЫМ НАГРЕВОМ

Нагрев электропроводящего тела, обладающего высоким электрическим сопротивлением при прохождении через него электрического тока, называют *резистивным*. При этом, как правило, используют переменный ток.

Достоинства резистивного нагрева — высокий КПД, низкая стоимость оборудования, безопасность в работе (низкое напряжение на зажимах) и малые габаритные размеры. Факторами, ограничивающими применение испарителей с резистивным нагревом, являются возможность загрязнения наносимой пленки материалом нагревателя, а также малый ресурс работы из-за старения (разрушения) нагревателя, что требует его периодической (иногда довольно частой) замены.

Испарители этого типа различных конструктивных вариантов могут быть с непосредственным или с косвенным нагревом испаряемого вещества.

Материалы, используемые для изготовления испарителей, должны отвечать следующим требованиям. Испаряемость материала испарителя при температуре испаряемого вещества

должна быть пренебрежимо малой. Для хорошего теплового контакта материал испарителя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым веществом. Между материалом испарителя и испаряемым веществом не должны происходить никакие химические реакции, а также образовываться легкоиспаряемые сплавы, так как это приводит к загрязнению наносимых пленок и разрушению испарителей.

Для изготовления испарителей промышленных установок используют тугоплавкие металлы (вольфрам, тантал, молибден).

Следует особо отметить, что алюминий, применяемый для нанесения пленок, в расплавленном состоянии обладает высокой химической активностью и взаимодействует практически с любыми металлами, из которых изготавливают испарители. Это значительно снижает их срок службы. Поэтому такие испарители являются одноразовыми и после каждого процесса испарения их заменяют.

В испарителях с непосредственным нагревом ток в несколько десятков ампер проходит непосредственно через испаряемый материал. Такой метод испарения может быть применен только для сублимирующихся металлов, т. е. металлов, температура плавления которых выше температуры испарения (хром, титан и др. — см. табл. 2).

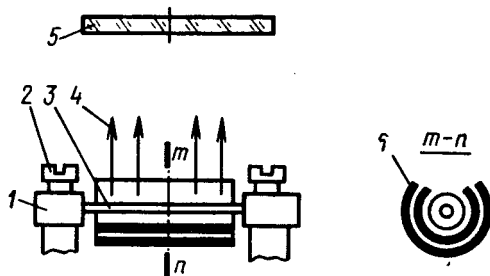
Основное достоинство этих испарителей — отсутствие теплового контакта между их нагретыми элементами и испаряемым металлом, что обеспечивает высокую чистоту наносимой пленки. Однако они обеспечивают низкую скорость испарения, дают возможность испарять малое количество материала, который может быть использован только в виде ленты или проволоки, а также не позволяют испарять диэлектрики и большинство металлов. Сечение таких испарителей должно быть одинаковым на всем протяжении, иначе в месте утонения возникает перегрев и они перегорают.

Испаритель с резистивным непосредственным нагревом показан на рис. 18. Испаряемый материал 3 в виде проволоки или ленты вставляют в изготавливаемые из титана или нержавеющей стали и закрепляемые винтами 2 массивные контактные зажимы 1, к которым подводится электропитание. Для снижения тепловых потерь за счет излучения, а также ограничения потока пара 4 в направлении к подложке 5 служит многослойный экран 6.

Испарители с косвенным нагревом, в которых испаряемое вещество нагревается за счет теплопередачи от нагревателя, более универсальны, так как позволяют испарять проводящие и непроводящие материалы в виде порошка, гранул, проволоки, ленты и др. Но при этом из-за контакта с нагретыми частями

Рис. 18. Испаритель с резистивным непосредственным нагревом:

1 — контактный зажим, 2 — винт, 3 — испаряемый материал, 4 — поток пара, 5 — подложка, 6 — многослойный экран



испарителя, а также из-за испарения материала подогревателя осаждаются менее чистые пленки.

Поверхность резистивных испарителей предварительно очищают, промывая в растворителях. Часто их также отжигают в вакууме. Так как форма испарителя с косвенным нагревом зависит от агрегатного состояния, в котором находится испаряемый материал, их подразделяют на проволочные, ленточные и тигельные.

Проволочные испарители применяют для испарения веществ, которые смачивают материал нагревателя. При этом расплавленное вещество силами поверхностного натяжения удерживается в виде капли на проволочном нагревателе. Проволочные испарители изготавливаются V- и W-образной формы, а также спирали- и волнообразной.

Проволочный испаритель простейшей конструкции (рис. 19, а) используют для нанесения пленок алюминия, который хорошо смачивает вольфрамовый проволочный нагреватель — цилиндрическую проволочную спираль 2. Испаряемое вещество в виде скобочек (гусариков) 3 навешивают на спираль, кото-

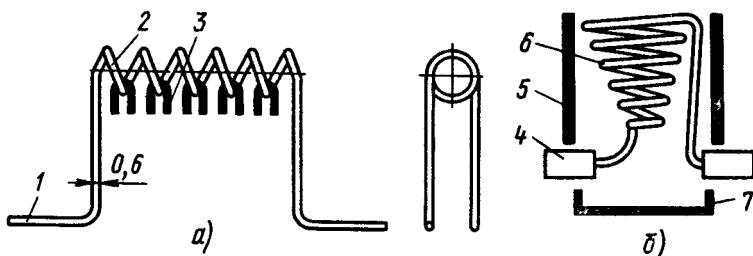


Рис. 19. Проволочные испарители косвенного нагрева с цилиндрической (а) и конической (б) проволочной спиралью:

1 — отогнутый конец спирали, 2, б — цилиндрическая и коническая спирали, 3 — испаряемый материал (гусарик), 4 — зажимы токоподвода, 5, 7 — цилиндрический тепловой и ограничивающий экраны

рую отогнутыми концами 1 вставляют в контактные зажимы. По мере нагрева это вещество плавится и формируется на проволоке в виде капель. Снизу размещаются тепловой и ограничивающий экраны. Проволочные испарители предназначены для создания протяженного потока испаряемого материала, что достигается использованием одновременно нескольких навесок.

При плохой смачиваемости испаряемого вещества, а также для испарения навесок в форме гранул или кусочков применяют испарители в виде конической проволочной спирали 6 (рис. 19, б), закрепляемой на зажимах 4 токоподвода. Спираль окружена цилиндрическим тепловым экраном 5, а снизу размещается ограничивающий экран 7.

Наиболее распространенными материалами для изготовления проволочных испарителей является проволока $\phi 0,5 - 1$ мм из фольфрама и тантала.

Существенным достоинством проволочных испарителей является простота их конструкции и возможность модификации под конкретные технологические условия. Кроме того, они хорошо компенсируют расширение и сжатие при нагреве и охлаждении. Недостаток этих испарителей — малое количество испаряемого за один процесс материала.

Ленточные испарители применяются для испарения металлов, плохо удерживающихся на проволочных испарителях, а также диэлектриков и изготавливаются с углублениями в виде полусфер, желобков, коробочек или лодочек. Наиболее распространенными материалами для таких испарителей является фольга толщиной $0,1 - 0,3$ мм из вольфрама, молибдена и тантала. Испаритель с углублением в виде полусферы, предназначенный для испарения относительно малых количеств вещества, показан на рис. 20, а. Для снижения теплового потока из зоны испарения к зажимам токоподводов по краям полусферы имеются утонения сечения (шейки).

Испарители лодочного типа (рис. 20, б) предназначены для испарения относительно больших количеств вещества. Чтобы скомпенсировать деформации испарителя, его профиль усложнен отгибом лапок, которыми он крепится к зажимам токоподвода.

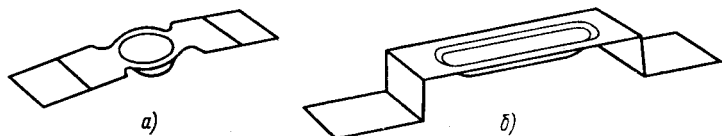


Рис. 20. Ленточные испарители косвенного нагрева из вольфрама, молибдена и тантала толщиной $0,1 \div 0,5$ мм:

а — с углублением в виде полусферы, б — лодочного типа

Если для металлов благодаря их высокой теплопроводности испарение в вакууме есть явление поверхностное, то для таких неметаллических веществ плохой теплопроводности, как диэлектрики (например, SiO_2), существует большая вероятность из разбрызгивания при форсированном испарении. В этих случаях применяют испарители коробчатого типа усложненной конструкции (рис. 21), выполненные из ленты толщиной 0,1 мм в виде коробочки 1, в которую засыпают испаряемое вещество 5. Сверху коробочка закрывается однослойным или двухслойным экраном 3 с отверстиями, через которые проходят пары 4 наносимого материала.

В случае применения двухслойного экрана отверстия располагают в шахматном порядке, что полностью исключает прямой пролет крупных частиц испаряемого вещества. Помимо предохранения от разбрызгивания такие испарители позволяют создавать над поверхностью испаряемого вещества ограниченное пространство, в котором пар 4 близок к насыщенному, что затрудняет обеднение соединения более легко испаряющимся компонентом.

Эффективную защиту от разбрызгивания капель, которым сопровождается процесс испарения некоторых веществ, обеспечивают лабиринтные испарители. Как видно из названия, эти испарители имеют форму, исключаящую прямой путь для выхода крупных частиц вещества в момент взрывного испарения. В результате поступающее в лабиринтный испаритель гранулированное вещество выходит из него только в виде пара в предпочтительном направлении в сторону подложек.

Лабиринтный испаритель для оксида кремния (рис. 22) выполнен в виде коробочки 1, по краям которой имеются лапки 2 для подсоединения к зажимам токоподвода. Сверху

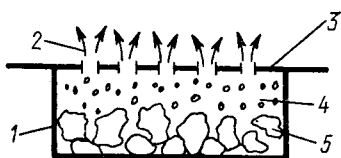


Рис. 21. Испаритель косвенного нагрева коробчатого типа:

1 — коробочка, 2 — поток паров наносимого вещества, 3 — экран, 4 — пары испаряемого вещества, 5 — испаряемое вещество

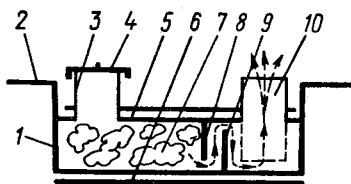


Рис. 22. Испаритель косвенного нагрева лабиринтного типа:

1 — коробочка, 2 — лапки, 3, 4 — патрубок для загрузки материала и его крышка, 5 — крышка испарителя, 6 — нижний экран, 7 — испаряемое вещество, 8, 9 — разделительные экраны, 10 — выходной патрубок

коробочка закрыта крышкой 5, имеющей боковой и нижний 6 экраны для снижения тепловых потерь излучением. В верхней части крышки имеются два патрубка. Через патрубок 3 в левую часть коробочки засыпают испаряемый материал 7, а затем этот патрубок закрывают круглой крышкой 4. Через правый патрубок 10 поступают пары наносимого материала, которые предварительно в коробочке проходят по лабиринту, образованному экранами 8 и 9, и из них отсеиваются макроскопические частицы.

В производстве часто бывает необходимо наносить пленки, состоящие не из одного вещества, а являющиеся сплавами. Это представляет наибольшую трудность в тонкопленочной технологии. Вследствие различной упругости паров компонентов сплава состав пленки может заметно отличаться от исходного (эффект фракционирования сплава). Так, при нанесении сплава нихрома (Ni 80 %, Cr 20 %) при $t = 1400^\circ \text{C}$ на подложке образуется пленка, имеющая следующий состав: Ni — 60 %, Cr — 40 %.

Для получения состава пленок, соответствующего составу исходного сплава, применяют метод микродозирования (дискретное или взрывное испарение). Сущность этого метода (рис. 23) состоит в том, что из дозатора 4 на ленточный разогретый испаритель 5 дискретно сбрасываются небольшие порции порошка 1 испаряемого сплава с размерами частиц 100–200 мкм. Испарение микродоз происходит практически мгновенно и полностью, в результате чего на подложке 3 последовательно осаждаются очень тонкие слои. В пределах каждого слоя наблюдается неоднородный состав (вследствие фракционирования сплава), однако уже в процессе нанесения взаимной диффузией атомов составляющих компонентов выравнивается концентрация каждого из них по толщине пленки.

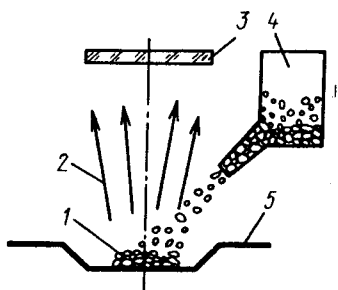


Рис. 23. Метод дискретного испарения:

1 — испаряемый порошок, 2 — пары наносимого вещества, 3 — подложка, 4 — дозатор, 5 — ленточный испаритель

Этот метод особенно эффективен при нанесении многокомпонентных сплавов (например, МЛТ-2М, нихром — оксид кремния). Достоинством его является также отсутствие загрязнений пленки материалом испарителя (малое время контакта микродозы сплава с испарителем).

Основной недостаток метода микродозирования — сложность

наладки дозатора для подачи особо мелких порций испаряемого сплава. В условиях большого теплоизлучения (от перегретого металлического испарителя) устойчивую работу дозатора обеспечить трудно. Кроме того, имеется опасность не испарения, а разбрызгивания вещества в виде капель или твердых частиц.

Тигельные испарители используют, как правило, для испарения больших количеств сыпучих диэлектрических материалов. Тигли изготавливают из тугоплавких металлов, кварца, графита, а также керамических материалов (нитрида бора BN, оксида алюминия Al_2O_3 — алунда). Максимально допустимая температура кварца составляет $1400^\circ C$, графита — $3000^\circ C$, оксида алюминия — $1600^\circ C$.

Два типа испарителей с тиглями из керамики показаны на рис. 24, а, б.

В испарителе первого типа (рис. 24, а) нагреватель в виде плоской улиткообразной спирали 1 располагается в полости керамического тигля 2, куда насыпается испаряемый материал. Такой испаритель позволяет испарять с высокими скоростями большое количество вещества.

В испарителе второго типа нагреватель в виде конусообразной спирали 1 расположен с внешней стороны керамического тигля 2.

При равной мощности питания первый испаритель нагревается до более высокой температуры, чем второй. Однако достоинством второго является отсутствие контакта испаряемого материала со спиральным нагревателем. Эксплуатационным недостатком тигельных испарителей является то, что они довольно инерционны, так как малая теплопроводность материала, из которого изготавливают тигель, не обеспечивает быстрого нагрева испаряемого вещества.

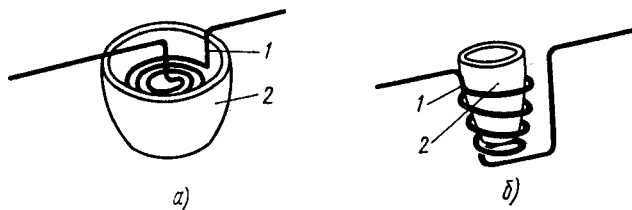


Рис. 24. Испарители прямого нагрева с тиглями с внутренним (а) и внешним (б) спиральными нагревателями:
1 — спираль, 2 — тигель

§ 8. ИСПАРИТЕЛИ С ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ НАГРЕВОМ

Принцип электронно-лучевого нагрева состоит в том, что кинетическая энергия потока ускоренных электронов при бомбардировке ими поверхности вещества превращается в тепловую энергию, в результате чего оно нагревается до температуры испарения.

Для образования электронного луча необходим источник свободных, т. е. не связанных с другими частицами, электронов. Для того чтобы электрон вылетел из металла наружу, его скорость должна быть направлена в сторону поверхности металла и он должен преодолеть действие сил, стремящихся возвратить его обратно в металл.

Работу по преодолению электроном поверхностных сил, стремящихся удержать его в металле, называют *работой выхода*. При комнатной температуре количество электронов в металле, энергия которых превышает работу выхода, ничтожно мало. Однако их количество резко возрастает при росте температуры за счет увеличения интенсивности теплового хаотического движения.

Испускание электронов металлами, нагретыми до высокой температуры, называют *термоэлектронной эмиссией* (рис. 25, а), а выполненные из металла элементы, используемые для получения свободных электронов, — *термоэлектронными катодами*, или просто *катодами*. Материалом катодов обычно служит вольфрамовая проволока. Для накала катода, помещенного в вакуумную камеру, через него пропускают электрический ток.

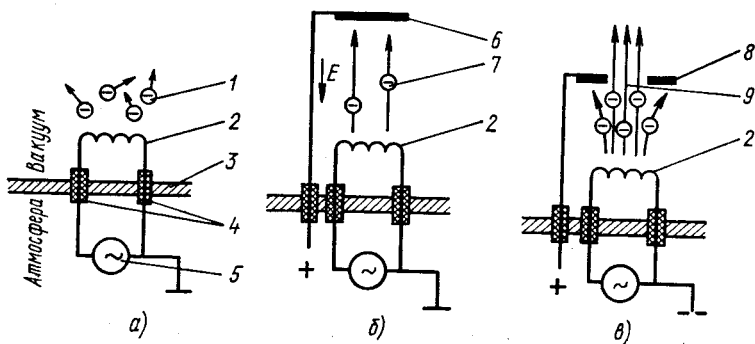


Рис. 25. Эффект термоэмиссии (а), ускорение электронов (б) и формирование электронного луча (в):

1 — эмиттированные электроны, 2 — термокатод, 3 — стенка вакуумной камеры, 4 — изоляторы, 5 — источник питания термокатада, 7 — ускоренный электрон, 6, 8 — аноды, 9 — электронный луч

Спиральный термокатод 2 закрепляют на стенках 3 вакуумной камеры через изоляторы 4. При подаче тока накала от источника 5 происходит нагрев термокатада с испусканием электронов 1. Эти электроны обладают разной энергией и направление их движения от катода хаотично. Для ускорения (повышения энергии) и направленного движения электронов необходимо создать ускоряющее электрическое поле.

Рассматривая движение электронов в электрическом поле, предполагают, что они находятся в достаточно разреженном пространстве. При этом взаимодействием между молекулами оставшегося в объеме газа и движущимися электронами можно пренебречь.

Как известно из электротехники, на заряженную частицу — электрон, находящуюся в электрическом поле, действует сила, пропорциональная напряженности этого поля, в результате чего частица ускоряется. Скорость (км/с), которую приобретет электрон под действием разности потенциалов U между двумя точками поля, равна

$$v_e = 593 \sqrt{U}. \quad (6)$$

При этом кинетическая энергия (эВ) электрона

$$w_k = m_e v_e^2 / 2, \quad (7)$$

где m_e — масса электрона.

В устройстве для ускорения электронов (рис. 25, б) в нескольких сантиметрах от катода размещают анод 6, создающий электрическое поле E , направление которого показано стрелкой. Между анодом 6 и катодом 2 образуется разность потенциалов от 5 до 10 кВ. Электроны, эмиттируемые катодом 2, притягиваются анодом 6 и образуют направленный поток ускоренных электронов 7.

Для формирования электронного луча 9 (рис. 25, в) используют анод 8 с отверстием, через которое проходит значительная часть электронного потока.

Рассмотрим движение электрона в магнитном поле и силу, действующую на электрон, влетающий в магнитное поле между полюсами постоянного магнита перпендикулярно силовым линиям этого поля (рис. 26).

Движущийся электрон можно представить как электрический ток, проходящий через проводник. Тогда по известному из электротехники правилу левой руки можно определить направление силы, действующей на электрон. Если расположить левую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля упирались в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены в сторону, противоположную направлению скорости v электрона

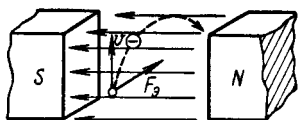


Рис. 26. Движение электронов в магнитном поле

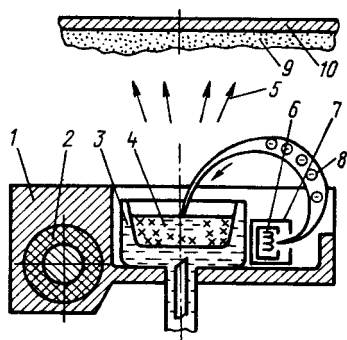


Рис. 27. Электронно-лучевой испаритель:

1 — полюсный наконечник, 2 — электромагнит, 3 — водоохлаждаемый тигель, 4 — испаряемый материал, 5 — поток наносимого материала, 6 — термокатод, 7 — фокусирующая система, 8 — электронный луч, 9 — тонкая пленка, 10 — подложка

то отогнутый большой палец покажет направление силы, действующей на летящий электрон. Эта сила будет пропорциональна напряженности магнитного поля и скорости электрона.

Таким образом, сила F_z , действующая на электрон, перпендикулярна направлениям скорости его движения и силовых линий магнитного поля. Поскольку сила F_z действует всегда перпендикулярно скорости движения электрона, она изменяет не скорость его, а только направление. Под действием этой силы траектория движения электрона непрерывно изменяется, т. е. искривляется (как это показано на рис. 26 штриховой линией). Следовательно, если перпендикулярно электронному лучу приложить магнитное поле, он отклонится.

Фокусировка электронного луча позволяет получать большую концентрацию мощности на сравнительно малой поверхности (5×10^8 Вт/см²), а следовательно, испарять любые, даже самые тугоплавкие материалы с достаточно большой скоростью.

Электронно-лучевой испаритель (рис. 27) состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля.

Электронная пушка предназначена для формирования потока электронов и состоит из вольфрамового термокатода 6 и фокусирующей системы 7. Электроны, эмитируемые катодом, проходят фокусирующую систему, ускоряются за счет разности потенциалов между катодом и анодом (до 10 кВ) и формируются в электронный луч 8.

Отклоняющая система предназначена для создания магнитного поля, перпендикулярного направлению скорости движения электронов, выходящих из фокусирующей системы пушки, и состоит из полюсных наконечников 1 и электромагнита 2. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель 3 и электронная пушка. Отклоняя электронный луч магнитным полем, его направляют в центральную часть водоохлаждаемого тигля 3. В месте падения луча создается локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретый электронной бомбардировкой материал 4 испаряется, и поток паров 5 осаждается в виде тонкой пленки 9 на подложке 10. Изменяя ток в катушке электромагнита 2, можно сканировать лучом вдоль тигля, что предотвращает образование "кратера" в испаряемом материале.

Медные водоохлаждаемые тигли емкостью 50 см³ и более обеспечивают длительную непрерывную работу без добавки испаряемого материала, который, кроме того, не контактирует в расплавленном виде с медными стенками тигля ("автотигельное испарение"), а значит, и исключается их взаимодействие.

Электронно-лучевые испарители могут быть одно- и многотигельной конструкции, с разворотом луча на 270 и 180°. При угле отклонения электронного луча до 270° исключается попадание испаряемого материала на катод и загрязнение наносимых пленок материалом катода, который во время работы также испаряется.

Недостатки этих испарителей — сложность аппаратуры питания и управления, трудность испарения металлов высокой теплопроводности (медь, алюминий, серебро, золото) из водоохлаждаемого тигля, необходимость частой замены и юстировки катода, а также питание высоким напряжением, что требует соблюдения соответствующих правил техники безопасности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы методы повышения равномерности распределения толщины пленки по подложке?
2. Какие типы испарителей с резистивным нагревом вы знаете?
3. Какие испарители имеют косвенный и непосредственный нагрев?
4. Как устроены проволочные и ленточные испарители?
5. Каковы особенности дискретного (взрывного) метода испарения?
6. Каков принцип действия тигельных испарителей?
7. Что такое термоэмиссия?
8. Как происходит ускорение электронов?
9. Каковы устройства и принцип действия электронно-лучевого испарителя?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

§ 9. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Принцип действия устройств ионного распыления основан на таких физических явлениях, как ионизация частиц газа, тлеющий разряд в вакууме и распыление веществ бомбардировкой ускоренными ионами.

Ионизация — это процесс превращения нейтральных частиц газа (атомов и молекул) в положительно заряженные ионы. Сущность этого процесса состоит в следующем (рис. 28). Находящийся между двумя электродами газ всегда содержит несколько свободных электронов. Если между электродами — анодом 4 и катодом 9 — создать электрическое поле (от источника 8 через балластный резистор 7), это поле будет ускорять свободные электроны. При встрече с нейтральной частицей газа 3 ускоренный первичный электрон 1 выбивает из нее вторичный электрон 6, превращая нейтральную частицу газа в положительно заряженный ион 5. Таким образом, в результате столкновения появляется новая пара заряженных частиц: выбитый вторичный электрон 6 и положительно заряженный ион 5.

Отраженный первичный электрон 2 и вторичный электрон 6, в свою очередь, могут быть ускорены электрическим полем и при взаимодействии с нейтральными частицами газа образовать по паре заряженных частиц. Так развивается лавинообразный процесс появления в газовой среде двух видов заряженных частиц, и газ, будучи в нормальных условиях электрическим изолятором, становится проводником.

Тлеющий разряд является одним из видов стационарного разряда в газах. Сущность его можно пояснить на простейшем устройстве, показанном на рис. 29, а. С двух сторон в вакуумный стеклянный баллон 3 впаяны два металлических дискообразных электрода — катод 1 и анод 5. При давлении порядка 0,1 — 10 Па и подаче напряжения около 3—4 кВ в результате ионизации газа в баллоне возникает свечение, которое и является внешним признаком тлеющего разряда.

Подробно не рассматривая структуру разряда, можно разделить разрядное пространство на две основные области: темную катодную 2 и положительный светящийся столб 4. Толщина d_k темного катодного пространства приблизительно равна среднему расстоянию, которое проходит электрон от катода до первого ионизирующего столкновения, когда он не теряет полностью своей энергии.

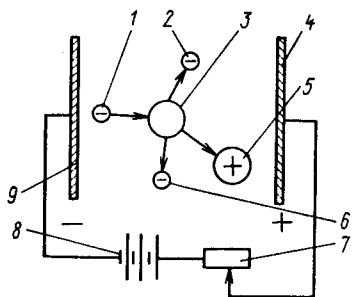


Рис. 28. Процесс ионизации:
 1, 2 — ускоренный и отраженный первичные электроны, 3 — нейтральная частица газа, 4 — анод, 5 — ион, 6 — выбитый вторичный электрон, 7 — резистор, 8 — источник питания, 9 — катод

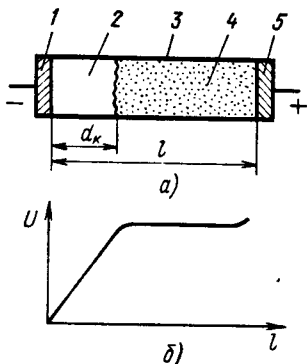


Рис. 29. Образование тлеющего разряда (а) и распределение потенциала между электродами (б):
 1 — катод, 2 — темное катодное пространство, 3 — вакуумный баллон, 4 — положительный светящийся столб, 5 — анод

Так как при дальнейшем движении к аноду электрон способен многократно ионизировать частицы газа, непосредственно за темным катодным пространством образуется область ионизированного газа. Свечение положительного столба объясняется возбуждением нейтральных молекул газа при их столкновении с электронами. В положительном столбе концентрации ионов и электронов примерно одинаковы и весьма высоки.

Состояние газовой среды, при котором в ней концентрации электронов и ионов приблизительно равны, называют *плазмой*.

Для тлеющего разряда характерно определенное распределение потенциала по длине баллона l . Как видно из рис. 29, б, в основном падение приложенного напряжения происходит на темном катодном пространстве. Кроме того, в темном катодном пространстве, где сосредоточено максимальное электрическое поле, электроны ускоряются до энергии ионизации газа, в результате чего поддерживается разряд.

Положительный столб имеет одинаковые концентрации электронов и ионов, характеризуется высокой проводимостью и поэтому малым падением напряжения.

Ионы, оказавшиеся на границе темного катодного пространства, ускоряются в направлении катода сильным электрическим полем, бомбардируют и распыляют его. При этом ионы нейтрализуются электронами, поступающими на катод из внешней цепи. Одновременно с распылением катода ионы выбива-

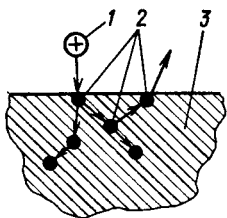


Рис. 30. Схема ионного распыления:
1 — ион, 2 — поверхностный атом, 3 — распыляемое вещество

Ионное распыление (рис. 30) можно объяснить с позиций импульсного механизма воздействия ускоренных ионов на поверхностные частицы бомбардируемого материала. В атомном масштабе это явление сравнимо с ударом двух бильярдных шаров, из которых один представляет собой падающий ион, а другой — атом твердого тела, встреченного ионом. При распылении вещества 3 ион 1 передает импульс энергии его атому, который, в свою очередь, может передать импульс другим атомам, вызвав тем самым каскад столкновений, как это показано стрелками на рис. 30.

В том случае, когда поверхностный атом 2 распыляемого вещества 3 получит достаточный для разрыва связи с ближайшими соседними атомами импульс энергии, направленный от поверхности, он покинет ее. Направление полета этого атома соответствует направлению полученного импульса.

Показателем эффективности процесса ионного распыления является коэффициент распыления, который выражается числом удаленных частиц распыляемого вещества, приходящихся на один бомбардирующий ион, и обычно составляет от долей единиц до нескольких единиц. Коэффициент распыления зависит от энергии иона, его массы, угла падения, распыляемого материала и состояния его поверхности.

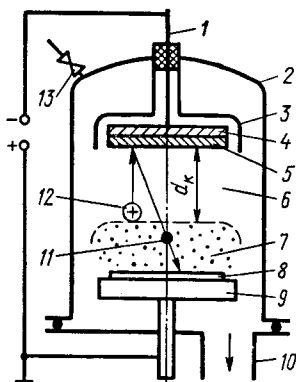
Существуют различные варианты реализации метода ионного распыления, среди которых наиболее распространены основанные на диодных и магнетронных системах. Диодные системы часто называют системами катодного распыления.

§ 10. ДИОДНЫЕ СИСТЕМЫ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Принцип действия диодной (двухэлектродной) системы ионного распыления показан на рис. 31. Два основных элемента системы — катод 4 и анод 9 — располагаются в рабочей вакуумной камере 2.

Катод 4 через высоковольтный ввод 1 подсоединяется к отрицательному полюсу высоковольтного источника. Подлежащий распылению материал в виде пластины 5 прикрепляет-

Рис. 31. Схема диодной (двухэлектродной) системы ионного распыления: 1 — высоковольтный ввод, 2 — вакуумная камера, 3 — экран, 4 — катод, 5 — пластина (мишень), 6 — темное катодное пространство, 7 — положительный столб, 8 — подложка, 9 — анод, 10 — патрубок к вакуумной системе, 11 — осаждаемые частицы, 12 — ионы, 13 — натекатель



ся к катоду. Эту пластину обычно называют *мишенью*. Анод 9, находящийся под потенциалом земли, располагается на расстоянии в несколько сантиметров от катода. Подложки 8, на которые наносят пленки, закрепляют на аноде. При подаче на катод напряжения порядка 3 — 5 кВ в камере возникает тлеющий разряд.

Как уже отмечалось, для тлеющего разряда характерно определенное распределение потенциала в пространстве между катодом и анодом. Причем в основном падение приложенного напряжения происходит на темном катодном пространстве 6. Ионы 12, диффундирующие к границе положительного столба 7, попадают на границу темного катодного пространства и, ускоряясь в нем под действием электрического поля, бомбардируют мишень (катод). Выбиваемые из нее частицы 11 распыляемого вещества летят в направлении к аноду 9 и осаждаются на подложке 8 в виде тонкой пленки.

Скорость нанесения тонких пленок в диодных системах составляет около 0,5 нм/с.

Как катод, так и анод охлаждаются проточной водой, что предохраняет их от перегрева. Кроме того, с обратной стороны мишени на расстоянии 3 — 5 мм расположен экран 3, локализирующий разряд только на ее лицевой стороне. Поэтому задняя часть катода не подвергается ионному распылению.

Размером d_k темного катодного пространства определяется минимальное расстояние между мишенью и подложкой, которое обычно составляет от 3 до 5 см. Если это расстояние меньше, разряд гаснет, так как путь, проходимый электронами между катодом и анодом, слишком короток для создания достаточного количества ионов и электронов.

Для предварительной откачки до вакуума порядка 10^{-4} Па

и последующего поддержания рабочего давления порядка 1 — 10 Па служит откачная система, подсоединяемая к патрубку 10. Рабочий газ вводят в камеру через натекаТЕЛЬ 13, одновременно продолжая откачку через патрубок 10. Это делают для того, чтобы через камеру проходил поток чистого, постоянно обновляемого газа. Обычно в качестве рабочего используют инертный газ — аргон очень высокой степени чистоты.

В рассмотренной системе диодного распыления мишень располагается вверху камеры. Однако мишени диодных систем могут иметь любое пространственное положение.

По сравнению с термовакuumным методом нанесения пленок метод диодного ионного распыления обладает рядом достоинств.

Большая площадь распыляемой мишени, выполняющей функции источника атомов осаждаемого вещества, позволяет осаждать равномерные по толщине пленки на подложках больших размеров, что обеспечивает эффективную реализацию группового метода обработки. Мишень представляет собой источник длительного действия частиц наносимого материала, что облегчает автоматизацию и повышает однородность процесса. Большая энергия конденсирующихся атомов обеспечивает высокую адгезию пленки к подложке.

Основным недостатком этого метода является необходимость для поддержания разряда относительно высокого давления аргона, что повышает вероятность загрязнения пленки газовыми включениями. Кроме того, при высоком давлении длина свободного пробега частиц составляет несколько миллиметров, поэтому они теряют свою энергию и изменяют направление движения при соударениях с молекулами остаточного газа. В результате поток осаждаемых на поверхность подложки частиц является хаотическим, что затрудняет возможность использования при распылении свободных масок, дающих размытое изображение элементов из-за эффекта "подпыления".

При проведении процесса распыления в диодных системах необходимо достаточно стабильно поддерживать давление, так как увеличение его повышает вероятность столкновения распыленных атомов с молекулами рабочего газа. В результате этого часть атомов не осаждается на подложке, рассеивается в объеме камеры или возвращается на мишень, а скорости распыления и осаждения падают, что может привести к непроизводительности толщины пленки.

В настоящее время диодные распылительные системы в основном используют при производстве гибридных ИМС. Объясняется это тем, что часть электронов может без столкновения пройти пространство катод-подложка и, будучи сильно

ускоренными, бомбардируют анод (подложку). Это вызывает значительный нагрев подложек, а также может привести к повреждению полупроводниковых структур.

§ 11. МАГНЕТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Магнетронные системы ионного распыления являются усовершенствованными диодными системами и отличаются от них наличием в прикатодной области электрического и кольцеобразного магнитного полей, направленных перпендикулярно друг к другу.

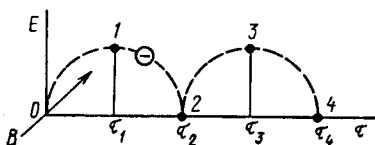
Прежде чем рассмотреть магнетронные системы, необходимо ознакомиться с законами движения заряженных частиц в скрещенных (направленных под углом друг к другу) электрическом и магнитном полях. Раздельное воздействие электрического и магнитного полей на движение заряженных частиц было рассмотрено в § 8 в связи с работой электронно-лучевых испарителей. Совершенно иначе ведут себя заряженные частицы при одновременном воздействии этих полей.

Остановимся на простейшем случае, когда эти поля однородны и направлены перпендикулярно друг к другу (рис. 32): электрическое E — по вертикальной оси, а магнитное B — перпендикулярно плоскости рисунка ("от нас"); время t отсчитывается по горизонтальной оси.

Пусть в некоторый начальный момент времени заряженная частица (электрон) находится в точке O и ее скорость равна нулю. Под действием электрического поля электрон начинает ускоряться вдоль оси E . По мере увеличения скорости сила, действующая со стороны магнитного поля, будет возрастать, так как она пропорциональна скорости, и движущийся электрон начнет отклоняться, т. е. траектория будет отклоняться (изгибаться) в сторону от оси E .

Постепенный поворот траектории должен привести к тому, что электрон, начиная с некоторого момента времени t_1 , которому соответствует точка 1, начнет двигаться к горизонтальной оси t . На участке траектории от точки 1 к точке 2 скорость электрона из-за торможения в электрическом поле уменьшается и обращается в нуль, когда он в момент времени t_2 достигает

Рис. 32. Траектория движения электрона во взаимно перпендикулярных магнитном и электрическом полях



горизонтальной оси — точка 2. Затем снова начнется процесс ускорения, сменяющийся фазой торможения и отклонением траектории от точки 3 до точки 4 и т.д.

Таким образом, траектория электрона состоит из периодически повторяющихся одинаковых фаз. Такая арочно-подобная кривая носит название *циклоиды*.

Рассмотрим влияние скрещенных полей на процесс ионного распыления. Напомним, что в диодной системе разряд поддерживается вторичными электронами, эмиттируемыми с поверхности катода-мишени под действием ионной бомбардировки. В этом случае (рис. 33, а) электроны покидают катод, ускоряются в перпендикулярном к нему направлении электрическим полем и, пройдя положительный столб, попадают на анод и захватываются им.

Если перпендикулярно электрическому полю наложить параллельно катоду и очень близко к нему магнитное поле (рис. 33, б), траектории электронов будут представлять собой циклоиды. Электроны, эмиттируемые катодом под действием ионной бомбардировки, не могут при этом двигаться к аноду в перпендикулярном направлении, так как оказываются в своеобразной ловушке, создаваемой магнитным полем.

До тех пор пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений электронов с атомами рабочего газа, они перемещаются в ловушке, теряют энергию, полученную от электрического поля. Большая часть энергии электронов расходуется на ионизацию в непосредственной близости от катода, где создается высокая концентрация положительных ионов. В результате возрастают интенсивность бомбардировки катода и скорость его распыления.

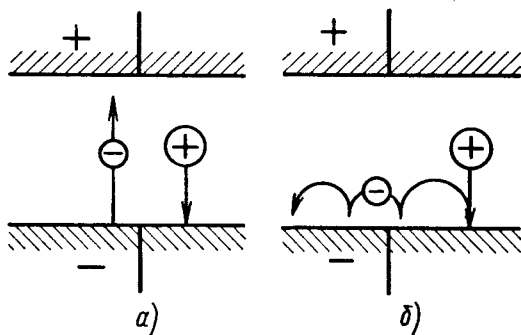


Рис. 33. Влияние скрещенных полей на характер ионного распыления в диодной (а) и магнетронной (б) системах

Скорость нанесения тонких пленок в магнетронных системах составляет 100 – 200 нм/с.

Так как применение магнитного поля увеличивает эффективность ионизации, глеющий разряд в магнетронных системах поддерживается при более низких давлениях, чем в диодных. Магнетронные системы весьма эффективно работают при давлениях вплоть до 10^{-2} Па и постоянном напряжении, что обеспечивает высокую чистоту наносимых пленок.

Подводя итоги, следует отметить, что источники магнетронного распыления, называемые *магратронами*, позволили значительно повысить параметры и расширить технологические возможности диодных распылительных систем:

увеличить более чем на порядок скорость нанесения пленок, приблизив ее к скорости термовакuumного осаждения, и уменьшить на порядок рабочее давление, а значит, и вероятность попадания газовых включений в пленку;

исключить интенсивную бомбардировку подложек высокоэнергетичными электронами, т. е. снизить неконтролируемый нагрев подложек и повреждение полупроводниковых структур;

обеспечить нанесение пленок алюминия и его сплавов с большими скоростями распыления;

заменить высоковольтное оборудование низковольтным.

Кроме того, магратроны обеспечивают длительный ресурс работы и открывают возможность создания промышленных установок полунепрерывного и непрерывного действия. В настоящее время магратроны являются одним из основных устройств нанесения тонких пленок при производстве всех типов ИМС.

В оборудовании для нанесения тонких пленок используют плоские (планарные) магратроны с кольцевой и овально-протяженной зонами эрозии, состоящие из следующих основных частей: водоохлаждаемого катода, магнитного блока и анода.

В кольцевом планарном магратроне (рис. 34) все элементы смонтированы в корпусе 18, присоединяемом к рабочей камере через промежуточное изолирующее кольцо 2 и фланец 4 с вакуумными уплотнительными прокладками 1 и 3. Дискообразная мишень-катод 19 охлаждается проточной водой по трубкам 14 и 17. Напряжение, подаваемое на катод через зажим 16, равно 300 – 700 В.

Под катодом расположен магнитный блок, состоящий из центрального 15 и периферийных 12 постоянных магнитов, закрепленных на основании блока 13, изготовленного из

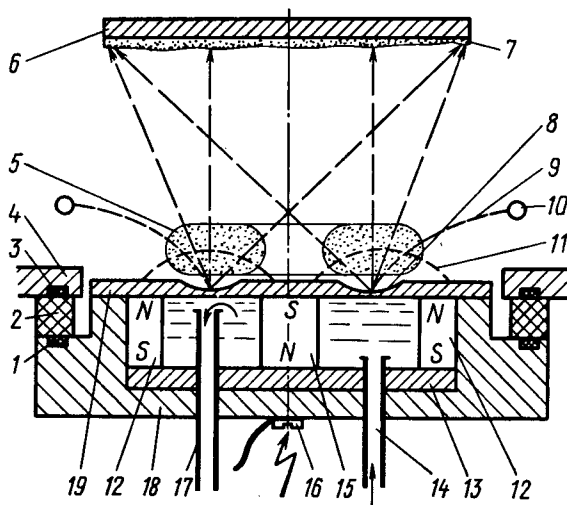


Рис. 34. Кольцевой планарный магнетрон:

1, 3 — уплотнительные прокладки, 2 — изолирующее кольцо, 4 — фланец камеры, 5, 8 — зоны плазмы и эрозии, 6 — подложка, 7 — тонкая пленка, 9, 11 — электрическое и магнитное поля, 10 — анод, 12, 15 — периферийные и центральный магниты, 13 — основание магнитного блока, 14, 17 — трубки подачи и слива воды, 16 — зажим, 18 — корпус, 19 — мишень

магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода магнитное поле 11 (порядка 0,02 — 0,05 Тл). Составляющая этого поля параллельна плоскости катода.

Анод 10 расположен над катодом и может находиться либо под потенциалом земли, либо под напряжением 30 — 100 В относительно катода и обеспечивает образование электрического поля 9. Составляющая этого поля перпендикулярна плоскости катода.

При подаче отрицательного потенциала на катод в прикатодной области образуется зона скрещенных магнитного и электрического полей. Находящиеся там электроны под действием этих полей совершают сложные движения, ионизируя газ. В результате возникает разряд и над поверхностью катода образуется кольцеобразная (торообразная) зона плазмы 5 — светящийся положительный столб. При этом положительные ионы ускоряются в направлении катода, бомбардируя и расплывая его поверхность в зоне 8, называемой зоной эрозии. Частицы материала, покидающие мишень, осаждаются в виде пленки 7 на подложке 6, а также частично рассеиваются молекулами остаточных газов и осаждаются на стенках рабочей

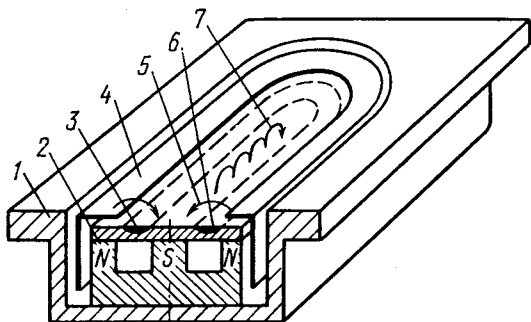


Рис. 35. Протяженный планарный магatron:
 1 — корпус, 2 — магнитный блок, 3 — мишень,
 4 — экран, 5 — магнитное поле, 6 — зона эрозии,
 7 — траектория электронов

камеры и поверхностях технологической внутрикамерной оснастки.

О в а л ь н о - п р о т я ж е н н ы й п л а н а р н ы й м а г н а т р о н (рис. 35) устроен аналогично и отличается лишь тем, что его магнитный блок имеет вытянутую конфигурацию, а зона эрозии представляет собой как бы два параллельных источника распыления. Сверху над полюсами магнита магнитного блока 2, имеющего III-образное сечение и размещенного в корпусе 1, располагается распыляемая мишень 3, а по периферии — заземленный экран 4.

§ 12. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ И РЕАКТИВНЫЙ МЕТОДЫ ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Для высокочастотного и реактивного ионного распыления используют как обычные диодные, так и магнетронные системы.

В ы с о к о ч а с т о т н о е р а с п ы л е н и е начали применять, когда потребовалось наносить диэлектрические пленки. В предыдущей главе предполагалось, что распыляемое вещество — металл. При этом ударяющийся о мишень ион рабочего газа нейтрализуется на ней и возвращается в вакуумный объем рабочей камеры.

Если же распыляемый материал — диэлектрик, то положительные ионы не нейтрализуются и за короткий промежуток времени после подачи отрицательного потенциала покрывают слоем мишень, создавая на ее поверхности положительный заряд. Поле этого заряда компенсирует первоначальное поле мишени, находящейся под отрицательным потенциалом, и

дальнейшее распыление становится невозможным, так как ионы из разряда не притягиваются к мишени.

Для того чтобы обеспечить распыление диэлектрической мишени, приходится нейтрализовать положительный заряд на ее поверхности подачей высокочастотного (ВЧ) переменного потенциала. При этом в системе распыления, которая представляет собой диодную систему (рис. 36, а, б) с катодом 2, окруженным экраном 1 (анодом может служить вакуумная камера), происходят следующие процессы.

Так как в плазме положительного столба 4 содержатся равные количества ионов и электронов, при переменной поляризации мишени во время отрицательного полупериода (рис. 36, а) она притягивает ионы 3. Ускоренные ионы бомбардируют и распыляют диэлектрическую мишень, одновременно передавая ей свой заряд. При этом мишень накапливает положительный заряд и интенсивность распыления начинает снижаться. Во время положительного полупериода (рис. 36, б) мишень притягивает электроны 5, которые нейтрализуют заряд ионов, превращая их в молекулы 6. В следующие отрицательный и положительный полупериоды процессы повторяются и т.д.

В промышленных установках ВЧ распыление ведется на единственной разрешенной частоте 13,56 МГц, которая находится в диапазоне радиосвязи. Поэтому иногда ВЧ распыление называют радиочастотным.

Реактивное распыление применяют для нанесения пленок химических соединений (оксидов, нитридов).

Требуемое химическое соединение получают, подбирая материал распыляемой мишени и рабочий газ.

При этом методе в рабочую камеру в процессе распыления вводят дозированное количество так называемых реактивных (химически активных) газов. Причем для нанесения пленок оксидов и нитридов в рабочий газ — аргон — добавляют соответственно кислород и азот. Основными условиями при получении требуемых соединений является тщательная

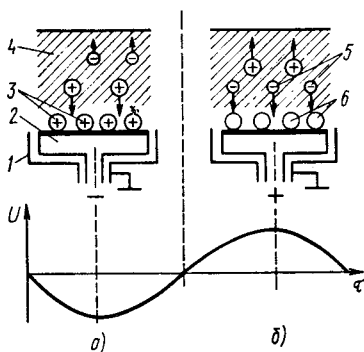


Рис. 36. Схемы высокочастотного распыления при отрицательном (а) и положительном (б) полупериодах напряжения:

1 — экран, 2 — катод, 3 — ионы, 4 — плазма, 5 — электроны, 6 — молекулы

очистка реагентов и отсутствие натекания, а также газовыделение в камере.

Недостаток реактивного распыления — возможность осаждения соединений на катоде, что существенно уменьшает скорость роста пленки.

При реактивном распылении реакции могут протекать как на мишени, так и в растущей пленке, что зависит от соотношений реактивного газа и аргона. В отсутствие аргона реакции происходят на мишени. При этом разряд протекает вяло, так как большинство атомов реактивного газа расходуется на образование на поверхности мишени соединений, которые препятствуют распылению. Чтобы реактивные процессы проходили на подложке, количество реактивного газа не должно превышать 10 %; остальное составляет аргон.

При реактивном распылении кремния напускаемый в рабочую камеру кислород взаимодействует с конденсирующими на поверхности подложки атомами кремния, в результате чего образуется пленка SiO_2 .

При нанесении реактивным распылением диэлектрических пленок нитрида кремния Si_3N_4 происходит аналогичный процесс. В рабочую камеру напускают тщательно осушенный и очищенный от кислорода аргон с добавкой азота. Ионы этих газов, бомбардируя кремниевый катод, выбивают из него атомы кремния и на подложке вследствие большой химической активности ионизированных атомов азота образуется пленка нитрида кремния Si_3N_4 , отличающаяся высокой химической стойкостью.

Так как условия реакции при нанесении диэлектрических пленок существенно зависят от постоянства в рабочем газе процентного содержания напускаемого реактивного газа, необходимо строго следить за его подачей. Напуск газов в рабочую камеру обычно производят двумя способами:

вводят оба газа (аргон и реактивный) из магистралей или баллонов, контролируя расход реактивного газа микро-расходомером и поддерживая постоянное давление;

вводят заранее подготовленную определенного состава рабочую смесь газов из резервуара.

К О Н Т Р О Л Ь Н Ы Е В О П Р О С Ы

1. Как происходит ионизация и возникает тлеющий разряд?
2. Каков механизм ионного распыления веществ?
3. Каков принцип действия диодной распылительной системы?
4. Каковы особенности магнетронного распыления?
5. Как устроен и работает кольцевой планарный магнетрон?

6. Чем отличается овально-протяженный магнетрон от кольцевого?
7. Какими методами наносят диэлектрические пленки?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИХ НАНЕСЕНИЯ

§ 13. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Получение высококачественных пленок с заранее заданными и воспроизводимыми параметрами предопределяет необходимость строгого контроля при их нанесении. Особенности контроля параметров тонкопленочных элементов определяются малыми толщинами наносимых пленок (от нескольких десятков до сотен нанометров). Параметры пленок контролируют непосредственно в процессе их нанесения в вакуумной рабочей камере и после нанесения, т. е. вне камер. Наиболее важен контроль в камере, так как в зависимости от его результатов регулируются режимы процесса роста пленки, что позволяет устранить операции подгонки ее параметров после нанесения.

Рассмотрим основные способы измерения и контроля таких параметров пленок, как толщина, электрическое сопротивление, адгезия и важнейшего технологического режима — скорости нанесения. В зависимости от назначения пленок обычно определяют метод их контроля и контролируют один или два параметра.

§ 14. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

Толщину пленок измеряют такими наиболее распространенными методами, как микровзвешивание и многолучевая интерферометрия.

Метод микровзвешивания, в основном используемый в производстве гибридных ИМС, состоит в определении приращения массы Δm подложки после нанесения на нее пленки. При этом среднюю толщину пленки определяют по формуле

$$d_{\Pi} = \Delta m / (F_{\Pi} \rho_{\text{м}}),$$

где F_{Π} — площадь пленки на подложке; $\rho_{\text{м}}$ — удельная масса нанесенного вещества.

Этот метод несложен, но требует, чтобы форма подложки была простой, а ее поверхность — в хорошем состоянии. Кроме того, на точность измерений влияет удельная масса нанесен-

ного материала, которая может изменяться в зависимости от условий технологических режимов (остаточного давления, загрязнений молекулами газа и др.).

При измерении толщины пленки взвешиванием считают, что плотность нанесенного вещества равна плотности массивного. Под эффективной толщиной пленки понимают толщину, которую она имела бы, если бы образующее ее вещество было равномерно распределено по поверхности с плотностью, равной плотности массивного вещества.

Чувствительность метода взвешивания составляет $1 - 10 \text{ мкм/м}^2$ и зависит от чувствительности весов и площади пленки на подложке $F_{\text{п}}$.

Метод многолучевой интерферометрии, применяемый для измерения толщины непрозрачных пленок, основан на наблюдении в микроскоп интерференционных полос, возникающих при рассмотрении в монохроматическом свете двух поверхностей, расположенных под углом друг к другу.

Перед измерением получают на образце так называемую ступеньку — резкую боковую границу пленки на подложке. Для этого маскируют часть подложки при осаждении пленки или химически удаляют часть осажденной пленки. В микроскоп наблюдают сдвиг интерференционных полос (рис. 37). Чередующиеся светлые и темные интерференционные полосы с шагом L на поверхности как пленки, так и подложки смещаются относительно друг друга у их границы на значение l .

Измеряя с помощью микроинтерференционного микроскопа смещение какой-либо определенной полосы, рассчитывают толщину пленки по формуле

$$d_{\text{п}} = \frac{1}{2} \lambda_{\text{с}} (l/L), \quad (8)$$

где $\lambda_{\text{с}}$ — длина волны монохроматического света, равна $0,54 \text{ мкм}$; $L = \frac{1}{2} \lambda_{\text{с}}$ — шаг между соседними интерференционными полосами; l — смещение интерференционной полосы.

Точность этого метода измерения толщины пленки составляет $15 - 30 \text{ нм}$.

Если пленка прозрачная, в месте "ступеньки" на нее и подложку осаждают дополнительно непрозрачную, хорошо отражающую свет металлическую пленку (например, алюминия), толщи-

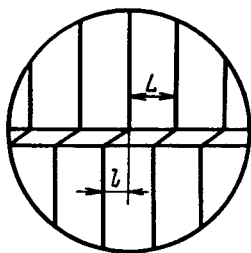


Рис. 37. Сдвиг интерференционных полос

на которой, чтобы уменьшить вносимую погрешность, должна быть много меньше толщины измеряемой пленки.

§ 15. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛЕНОК

Электрическое сопротивление пленок измеряют резистивным датчиком с внешним измерительным прибором. В основном этот метод применяют при контроле изготовления резисторов гибридных ИМС и он основан на том, что по мере утолщения пленки в процессе роста сопротивление ее уменьшается. Это позволяет непосредственно при нанесении контролировать сопротивление пленки, а при достижении номинальной ее толщины прекратить процесс.

При измерениях (рис. 38) предварительно изготавливают специальную контрольную подложку (свидетель) 1 из изоляционного материала (стекла, ситалла), на которую наносят плоские контактные площадки 2 из серебра или другого материала высокой проводимости. Затем эту подложку — "свидетель" устанавливают в рабочую камеру как можно ближе к рабочей подложке 3. Это необходимо для того, чтобы обе подложки при нанесении пленки находились в одинаковых условиях. Резистивную пленку наносят на контрольную и рабочую подложки одновременно.

При монтаже резистивного датчика в рабочую камеру соединяют контакты "свидетеля" с измерительным мостом, в результате чего сопротивление "свидетеля" регистрируется внешним прибором. В процессе осаждения резистивного материала рост пленки происходит как на рабочих подложках, так и на контрольной, т. е. формируется "резистор-свидетель". По мере роста сопротивление пленки уменьшается и соответственно уменьшается сопротивление "резистора-свидетеля". При достижении номинального (заданного) сопротивления наносимой пленки на "свидетеле" по цепи обратной связи поступает сигнал, которым либо выключается питание испарителя, либо закрывается заслонка.

Поскольку считают, что характеристики пленок на подлож-

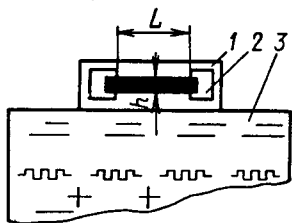


Рис. 38. Измерение сопротивления нанесенной пленки методом резистивного датчика: 1, 3 — контрольная и рабочая подложки, 2 — контакты

ке и "свидетеле" одинаковые, внешний измерительный прибор может быть отградуирован в единицах сопротивления (при постоянной температуре подложки).

Погрешность измерения сопротивления при контроле этим методом составляет примерно $\pm 10\%$ и определяется неравномерностью толщины пленки по поверхности (т. е. отличием сопротивлений "свидетеля" и рабочей подложки), а также погрешностями измерений.

Внешний измерительный прибор можно также отградуировать в единицах длины. Толщину пленки в этом случае определяют по формуле

$$d_{\Pi} = \rho_y L / (R_{\text{св}} h), \quad (9)$$

где ρ_y — удельное сопротивление пленки; $R_{\text{св}}$ — сопротивление пленки на "свидетеле" между контактами; L и h — длина и ширина пленки на "свидетеле".

Чувствительность метода составляет 1 — 5 нм, а предельная толщина измеряемых пленок — около 1 мкм.

Под толщиной пленки при этом понимают толщину, которую имел бы ее слой, если бы его удельное сопротивление было равно удельному сопротивлению массивного металла. Вследствие неопределенности значения удельного сопротивления наносимых пленок точность измерений этим методом невелика.

§ 16. ИЗМЕРЕНИЕ АДГЕЗИИ ПЛЕНОК

Сцепление (прилипание) поверхностей разнородных тел называют *адгезией*. Адгезия пленки к подложке зависит от материала пленки и скорости ее осаждения, а также от чистоты поверхности и температуры подложки.

В настоящее время не существует доступных промышленных методов высокоточного измерения адгезии тонких пленок к подложкам. Поэтому выполняют сравнительный контроль, при котором измеряют усилие отрыва пленки от подложки напаянным на ее поверхность металлическим цилиндром. В центре свободного торца цилиндра закрепляют гибкий тросик, связанный через рычаг с чашкой весов. Чтобы по усилию отрыва P определить адгезию G_a , необходимо точно знать площадь контакта F_k и исключить вызывающий неравномерное распределение усилия по его площади перекося цилиндра. Рассчитывают адгезию по формуле

$$G_a = P / F_k. \quad (10)$$

Обычно площадь торца цилиндра около 1 мм^2 . Для получения надежных данных следует измерить адгезию несколько раз, контролируя, не произошел ли отрыв по месту спая и не растрескалась ли пленка в припое.

Разновидность этого метода — контроль адгезии металлических пленок по отрыву от подложки с помощью тонкой золотой или алюминиевой проволоки, присоединяемой к пленке термокомпрессией. При этом площадь контакта составляет $50 - 200 \text{ мкм}^2$, что позволяет более точно определять адгезию локальных участков пленки.

§ 17. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК

Наиболее распространен контроль скорости нанесения пленок методом кварцевого датчика, который иногда называют резонансно-частотным. В качестве датчика при этом методе используют включенный в контур генератора частоты кварцевый элемент.

Принцип действия кварцевого датчика основан на зависимости частоты генерируемых сигналов от изменения массы кварцевого элемента при нанесении на его поверхность пленки. С увеличением массы кварцевого элемента его резонансная частота падает. Для линейного участка зависимости частоты от массы нанесенной пленки справедливо следующее соотношение:

$$\Delta f/f_0 = \Delta m/m_0, \quad (11)$$

где m_0 и f_0 — масса и резонансная частота кварцевого элемента до нанесения пленки; Δm и Δf — изменение массы кварцевого элемента и резонансной частоты после нанесения пленки.

Таким образом, по изменению скорости (сдвига) резонансной частоты, фиксируемому измерительным прибором, определяют скорость роста пленки.

Основной частью кварцевого датчика (рис. 39) является

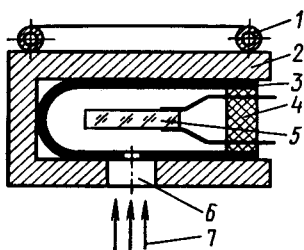


Рис. 39. Кварцевый датчик:

1 — медная трубка, 2 — держатель, 3 — кожух, 4 — керамический изолятор, 5 — кварцевый элемент, 6 — отверстие, 7 — поток частиц осаждаемого материала

кварцевый элемент 5 круглой или квадратной формы, на обе поверхности которого для подачи напряжения наносят тонкие слои золота или серебра. Кварцевый элемент крепится на изоляторе 4 и закрывается кожухом 3, который вставляется в массивный медный держатель 2, охлаждаемый по трубке 1 проточной водой. В кожухе и держателе имеется сквозное отверстие 6 для пропускания потока частиц наносимого материала к кварцевому элементу.

Необходимость эффективного охлаждения держателя объясняется тем, что кристаллы кварца очень чувствительны к изменениям температуры. При нанесении пленок источники излучают значительное количество теплоты, что вызывает повышение температуры кварцевого элемента. Нестабильность температуры кварцевого элемента является основной причиной неконтролируемого изменения частоты. Для исключения погрешностей измерений из-за нестабильности температуры датчика держатель охлаждают.

Этим методом можно также с учетом геометрических размеров кварцевого элемента и массы нанесенной пленки измерить ее толщину, используя следующую формулу:

$$d_{\Pi} = m_0 \Delta f / (\rho_{\Pi} F_{\Pi} f_0), \quad (12)$$

где F_{Π} — площадь кварцевого кристалла, покрытая пленкой наносимого вещества; ρ_{Π} — плотность наносимой пленки.

Точность измерения толщины тонких металлических и диэлектрических пленок в интервале от 10 нм до 5 мкм составляет $\pm 10\%$.

Выпускаемые серийно приборы позволяют задавать требуемую толщину пленки, после нанесения которой подается сигнал, останавливающий процесс. Для выполнения точных измерений приборы градуируют отдельно для каждого материала.

Максимально допустимая суммарная толщина пленки, наносимой на кварцевый датчик, определяется максимальным сдвигом частоты и примерно составляет 20 мкм алюминия. Максимальное значение измеряемой толщины можно увеличить, перекрывая периодически кварцевый элемент экраном.

Существенным недостатком метода является то, что помимо градуировки по осаждаемому материалу необходима также периодическая чистка кварцевых элементов от осажденной пленки.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как измеряют толщину наносимых пленок микровзвешиванием?
2. Каков принцип измерения толщины пленок методом лучевой интерферометрии?

3. Каковы особенности измерения сопротивления пленок с помощью резистивного датчика?
4. Как измеряют адгезию пленок?
5. На чем основано измерение скорости нанесения пленок с помощью кварцевого датчика?

ГЛАВА ПЯТАЯ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

§ 18. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Основным элементом вакуумных систем являются насосы, которые предназначены для создания требуемого вакуума в камерах установок, а также для поддержания рабочего давления при проведении технологического процесса. В установках для изготовления тонкопленочных структур ИМС применяются механические форвакуумные и двухроторные насосы, пароструйные диффузионные, а также криогенные и турбомолекулярные насосы.

При производстве ИМС в технологии нанесения тонких пленок требуется создавать давления в пределах от 10^5 Па (атмосферное) до 10^{-5} Па и ниже.

Ни один из указанных насосов не может самостоятельно обеспечить откачку от атмосферного давления до высокого вакуума по следующим причинам. Во-первых, при столь широком диапазоне давлений существенно отличаются условия откачки и, во-вторых, каждый насос обладает избирательностью по отношению к газам, входящим в состав воздуха.

Для создания технологического вакуума 10^{-5} Па включают каскадно несколько насосов различных типов. Кроме того, для каждого интервала давлений и для разных газов существуют свои методы откачки, не оптимальные для других условий.

Переходя к изучению вакуумных насосов, прежде всего рассмотрим их основные параметры — предельное остаточное давление, быстроту действия, наибольшие давления запуска и выпускное давление, которые обычно приводятся в паспортных данных.

Предельное остаточное давление — это наименьшее давление, которое может быть создано данным насосом при закрытом входном патрубке. При этом подразумевается, что отсутствует натекание в насос извне, со стороны его входного патрубка. Этот параметр обуславливает невозможность построения насоса, который сам не был даже очень слабым поставщиком газов в вакуумную систему.

Быстрота действия — это объем газа, откачиваемый в единицу времени при данном давлении на входе в насос (в сечении входного патрубка). Наиболее распространенными единицами измерения быстроты действия являются $\text{м}^3/\text{ч}$ и л/с . По постоянству быстроты действия при изменении давления можно судить о качестве насоса, которое тем выше, чем меньше изменяется быстрота действия при уменьшении давления во входном патрубке.

Наибольшее давление запуска — это наибольшее давление во входном патрубке, при котором насос начинает нормально работать, т. е. откачивать подсоединенную вакуумную камеру.

Вакуумные насосы можно по этому параметру разделить на две группы. К первой относятся насосы, наибольшее давление запуска которых равно атмосферному (механические форвакуумные). Во вторую входят насосы, требующие для работы предварительного разрежения, которое обычно создается дополнительным насосом, называемым *насосом предварительного разрежения, или предварительного вакуума* (механическим форвакуумным). Насос предварительного вакуума присоединяют впускным патрубком к выпускному патрубку насоса, нуждающегося в предварительном разрежении.

Наибольшее выпускное давление — это наибольшее давление в выходном патрубке, при котором насос еще может выполнять откачку (т. е. при превышении которого откачка прекращается). Для механических форвакуумных насосов оно превышает атмосферное, а для насосов, требующих предварительного разрежения, приблизительно равно наибольшему давлению запуска.

§ 19. МЕХАНИЧЕСКИЕ ФОРВАКУУМНЫЕ И ДВУХРОТОРНЫЕ НАСОСЫ

Насосы этих двух типов имеют одинаковые принципы действия, основанные на перемещении газа вследствие механического движения их рабочих частей, при котором происходит периодическое изменение объема рабочей камеры.

Механические форвакуумные и двухроторные насосы работают в области среднего вакуума, т. е. при давлении от 10^2 до 10^{-2} Па.

Механические форвакуумные насосы применяют в вакуумных установках для создания вакуума около 10^{-1} Па при быстроте действия порядка единиц и десятков литров в секунду. Наибольшее распространение получили пластинчато-роторные механические насосы с масляным уплотнением (рис. 40, а), основными конструктивными элементами которых являются корпус 6, камера 2 и ротор 1.

Рабочая камера расположена в заполненном вакуумным маслом корпусе 6. В роторе имеется сквозная щелевая прорезь, куда вставляются две пластины 4, между которыми расположена пружина 3.

Впускной патрубок 8 проходит через крышку корпуса 6, масляную ванну 5 и стенку камеры 2 в ее откачное пространство, где вращается ротор 1 в направлении, показанном стрелкой. Ось вращения ротора совпадает с его геометрической осью, но смещена вверх по отношению к оси рабочей камеры так, чтобы он при вращении постоянно соприкасался в верхней части с внутренней стенкой рабочей камеры. При вращении ротора пластины 4, разжимаемые пружиной 3 и центробежной силой вращения, скользят по внутренней цилиндрической поверхности рабочей камеры вдоль прорезей то сближаясь, то удаляясь друг от друга.

На выходном патрубке рабочей камеры 2 расположен представляющий собой подпружиненную пластину выхлопной кла-

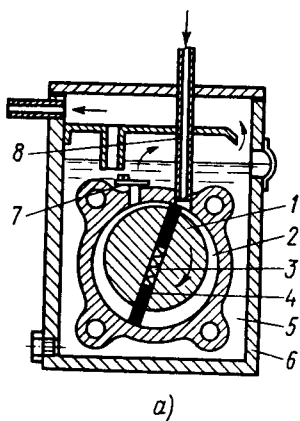
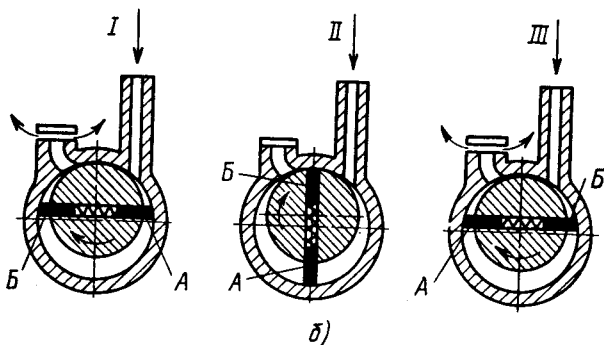


Рис. 40. Пластинчато-роторный механический насос:

a — устройство, *б* — принцип действия; 1 — ротор, 2 — камера, 3 — пружина, 4 — пластина, 5 — масляная ванна, 6 — корпус, 7 — выхлопной клапан, 8 — впускной патрубок



пан, предназначенный для пропускания газа, выбрасываемого из насоса, и не допускающий его обратного проникновения. При работе насоса масло должно находиться на определенном уровне над клапаном. Уровень масла контролируют визуально через специальное окошко.

Слой масла над клапаном предохраняет его от непосредственного соприкосновения с атмосферным воздухом, а также служит для охлаждения рабочей камеры, так как особенностью пластинчато-роторных насосов является наличие большого количества трущихся поверхностей, что обуславливает нагрев рабочих частей. Кроме того, часть масла, поступающая в рабочее пространство, служит для смазывания трущихся частей и уплотнения зазоров в роторном механизме насоса.

Принцип действия насоса поясняется рис. 40, б, где для простоты показаны только его рабочая камера с ротором и впускной и выпускной патрубки. Направления движения откачиваемого газа и вращения ротора указаны стрелками. Римскими цифрами указаны три характерных положения ротора, последовательно занимаемые им в течение одного полуоборота.

Если принять положение *I* за начальное, то в этом положении пластина *A*, продвинувшись вниз, создает расширение рабочего объема со стороны впускного патрубка 8, в результате чего происходит всасывание газа из откачиваемого объема (собственно откачка). Область между движущейся вниз пластиной и впускным патрубком насоса называют *объемом всасывания*.

Поступление газа в рабочий объем прекращается при подходе к впускному патрубку пластины *B* (положение *II*). При этом объем, находящийся перед пластиной *A*, отсекается от откачиваемого. Затем газ, захваченный в отсеченный объем, перегоняется к выпускному патрубку, сжимается пластиной *A* и выбрасывается в атмосферу (положение *III*) через выхлопной клапан 7.

Положение *III* совпадает с начальным положением *I*, с той разницей, что пластины меняются местами. Далее работа насоса продолжается в описанном порядке. В рабочей камере между пластинами всегда имеются три объема: разрежения, перегоняемый и сжатия.

Таким образом, каждая пластина выполняет двойную роль: с одной стороны, как бы тянет за собой газ, поступающий из впускного отверстия, а с другой — сжимает поступивший газ для выбрасывания его за пределы насоса через выпускной патрубок. При непрерывном вращении ротора всасывание и выбрасывание газа поочередно производятся обеими пластинами, в результате чего и происходит откачка вакуумного объема, к которому насос присоединяется впускным патрубком.

Так работает одноступенчатый насос, создающий вакуум порядка 10 Па. Для получения остаточного давления по воздуху до 10^{-1} Па применяют двухступенчатый насос, состоящий из двух последовательно соединенных ступеней, размещенных в одном корпусе. Первая ступень обеспечивает форвакуум для второй ступени, которую часто называют высоковакуумной. Эти ступени можно уподобить двум отдельным насосам, причем выпускной патрубок одного из них (ближайшего к откачиваемому объему) присоединяется к впускному патрубку другого.

Механические двухроторные насосы (рис. 41, а), иногда называемые насосами Рутса, применяют в вакуумных системах для создания давления порядка 10^{-2} Па при быстроте действия более 50 л/с, т. е. обеспечивают вакуум,

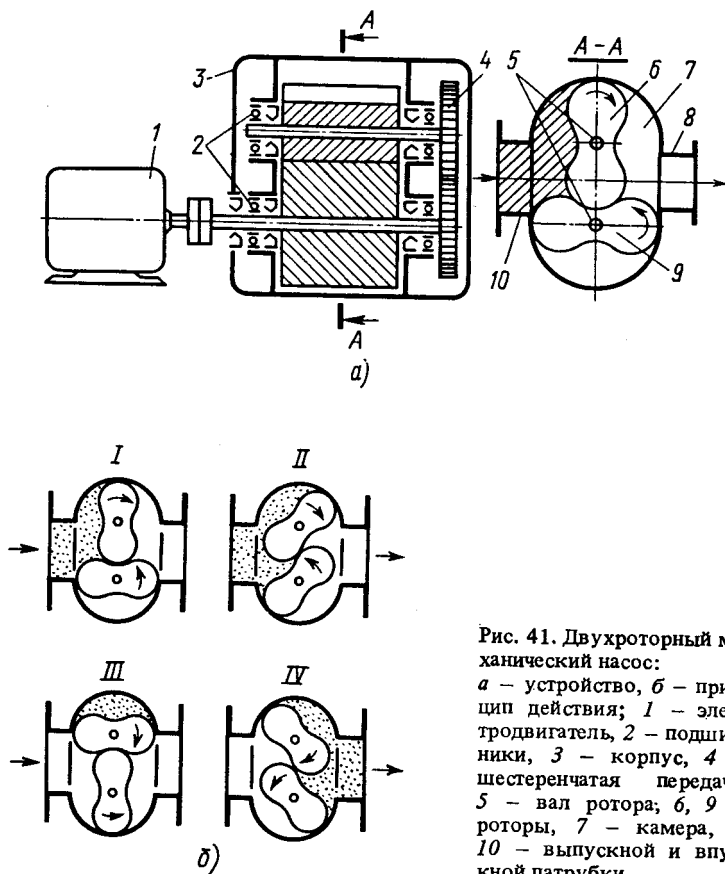


Рис. 41. Двухроторный механический насос:

а — устройство, б — принцип действия; 1 — электродвигатель, 2 — подшипники, 3 — корпус, 4 — шестеренчатая передача, 5 — вал ротора, 6, 9 — роторы, 7 — камера, 8, 10 — выпускной и впускной патрубки

при котором механические пластинчато-роторные насосы не эффективны. Кроме того, быстродействующие вращательные двухроторные насосы не имеют масляного уплотнения. Такие насосы состоят из корпуса 3 с впускным 10 и выпускным 8 патрубками и расположенной в корпусе камеры 7 с двумя роторами 6 и 9, имеющими конфигурацию в виде восьмерки.

При работе насоса (рис. 41, б) два ротора вращаются внутри камеры навстречу друг другу в направлениях, указанных стрелками. Роторы приводятся во вращение электродвигателем 1 через шестеренчатую передачу 4, связывающую их валы 5 и находящуюся вне камеры. Концы ротора опираются на подшипники 2. Во время работы роторы не касаются друг друга благодаря специальной профилировке и регулировке зазоров при сборке. Форма и синхронное вращение роторов подобраны так, чтобы между самими роторами, а также между ними и стенками камеры постоянно сохранялся небольшой зазор (0,1 — 0,15 мм), не уплотняемый маслом. Это допускает большую скорость вращения роторов (до 3000 об/мин) без опасности заедания и тем самым обеспечивается большая быстрота действия.

В положении *I* начинается всасывание газа верхним ротором, заканчиваемое в положении *II*, когда начинается всасывание нижним ротором. В положении *III* роторы меняются ролями (по сравнению с положением *I*): верхний ротор перегоняет захваченную порцию газа к выпускному патрубку, а нижний — продолжает всасывание. В положении *IV* верхний ротор начинает выброс газов в выпускной патрубок, а нижний — заканчивает всасывание. Затем верхний ротор начинает новый цикл всасывания, а нижний — выброса. Таким образом циклы всасывание — выброс газов повторяются.

При высоких давлениях, когда длина свободного пути молекул газа по сравнению с шириной зазора (0,1 — 0,15 мм) еще мала, насос не может работать эффективно, так как одновременно с захватом газа и выталкиванием его в сторону выпускного отверстия вращающимися роторами в откачиваемый объем через зазоры, имеющие при таких давлениях относительно большую пропускную способность, успевает проходить обратно большое количество газа. Поэтому рассматриваемый насос нуждается для нормальной работы в предварительном разрежении, для создания которого обычно применяют пластинчато-роторный насос.

Работа двухроторного насоса становится эффективной, когда насосом предварительного вакуума впускное давление снижается до нескольких сотен паскаль. Однако наибольшую быстроту действия получают при впускном давлении порядка

нескольких единиц паскаль, при котором длина свободного пути молекул газа становится равно нескольким миллиметрам, т. е. значительно превышает ширину зазоров, сопротивление которых обратному потоку газа (от впускного отверстия к впускному) при этих условиях сильно возрастает.

Таким образом, по своему принципу действия двухроторные насосы сходны с вращательными масляными: газ, поступающий в насос с впускной стороны, выбрасывается за его пределы с выпускной стороны.

Поскольку двухроторные насосы работают в паре с механическими форвакуумными, их komponуют в виде агрегата на едином основании.

§ 20. ДИФфуЗИОННЫЕ ПАРОМАСЛЯНЫЕ НАСОСЫ

Диффузионные паромасляные насосы являются наиболее распространенным высоковакуумным средством откачки и широко применяются в различных областях вакуумной техники.

Паромасляные насосы позволяют создавать вакуум до 10^{-5} Па.

Трехступенчатый диффузионный паромасляный насос (рис. 42) имеет цилиндрический корпус 12, охлаждаемый холодной водой, протекающей по змеевику 2. Входной патрубок 1 в верхней части корпуса служит для присоединения насоса к откачиваемому объему. Выпускной патрубок 3 расположен в нижней части корпуса, которая представляет собой кипяtilьник, куда заливается масло 5, подогреваемое снаружи электронагревателем 4. Паропроводы 6, 7, 8 расположены в корпусе насоса и заканчиваются зонтичными соплами 9, 10, 11.

При включении насоса рабочая жидкость (специальное масло) нагревается в кипяtilьнике, образовавшиеся пары поднимаются по паропроводам 6, 7 и 8, проходят по паропроводам вверх и с большой скоростью выбрасываются в виде струй через направленные под углом к охлаждаемой стенке насоса сопла 11, 10 и 9 соответственно первой, второй и третьей ступеней. Молекулы откачиваемого газа диффундируют в струи пара первой ступени и вместе с ними направляются на охлаждаемые водой стенки насоса. При этом пары масла конденсируются и образовавшиеся капли стекают в кипяtilьник.

Так обеспечивается непрерывная циркуляция рабочей жидкости в насосе. Увлеченный струей пара газ выбрасывается в основном вниз, последовательно диффундирует в струи пара второй и третьей ступеней и выбрасывается через выходной патрубок 3.

Паромасляные насосы не работают без предварительного

механического насоса, подсоединяемого к их выходному патрубку и обеспечивающего предварительное разрежение, а также без водяного охлаждения кожуха. Прекращение подачи воды в водяную рубашку может привести к перегреву насоса и сгоранию масла, а следовательно, к нарушению нормальной работы.

Недостаток диффузионных паромасляных насосов — возможность попадания в откачиваемый рабочий объем молекул масла, что может происходить двумя путями: пролетом в паровой фазе и миграцией по стенкам вакуумных трубопроводов. Так как проникающие в технологический объем молекулы масла оседают на подложках и загрязняют наносимые пленки, такие насосы применяют в технологических установках только в сочетании с ловушками паров масла.

Ловушка должна иметь холодные поверхности достаточных размеров и такие пути прохождения откачиваемого газа, а также паров масла, чтобы они могли попасть к выходу из нее только после соприкосновения по возможности со всей холодной поверхностью. Кроме того, пропускная способность ловушки должна быть достаточной.

Наибольшее распространение получили жалюзийные ловушки (рис. 43), охлаждаемые жидким азотом до температуры -196°C (77K). Такие ловушки имеют расширенный в средней части корпус 2, к которому сверху и снизу приварены фланцы 1 и 7 для подсоединения соответственно к откачиваемому объему и диффузионному насосу. Внутри корпуса расположен кольцевой резервуар, куда через тонкостенную трубку 4 заливается жидкий азот 5. К резервуару припаяны жалюзийно расположенные защитные вымораживающие экраны 3. Жидкий азот в ловушки заливается вручную или автоматическими перелив-

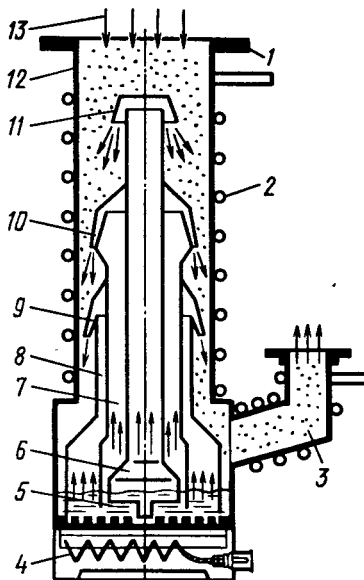


Рис. 42. Трехступенчатый диффузионный паромасляный насос:

1 — присоединительный фланец, 2 — змеевик водного охлаждения, 3 — выпускной патрубок, 4 — электронагреватель, 5 — масло, 6, 7, 8 — паропроводы первой, второй и третьей ступеней, 9, 10, 11 — сопла третьей, второй и первой ступеней, 12 — корпус, 13 — направление откачки

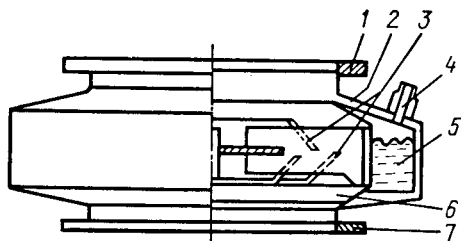


Рис. 43. Жалюзийная азотная ловушка:

1, 7 — фланцы, 2 — корпус, 3, 6 — вымораживающие и защитный экраны, 4 — трубка, 5 — жидкий азот

ными устройствами прямо из транспортных сосудов Дьюара. При этом его уровень также может контролироваться автоматически. Для защиты от прямого пролета молекул газа вниз по кольцевому резервуара имеется экран 6.

Прежде чем подвергнуть ловушку охлаждению, следует откачать рабочую камеру до достаточно низкого давления, при котором начинается заметная диффузия паров рабочей жидкости из насоса в вакуумную систему. Такой порядок необходим по ряду причин. Предположим, что ловушку охладили с самого начала откачки, когда в вакуумной системе еще было атмосферное давление. Тогда на ее поверхности будут конденсироваться не только пары, например влага из воздуха, но и входящие в него газы. Поэтому при откачке по мере снижения в вакуумной системе давления, когда оно становится ниже давления насыщения сконденсировавшихся газов, соответствующего температуре ловушки, с ее стенок начинается обратное газовыделение, что, конечно, замедляет откачку. Кроме того, неблагоприятное влияние оказывает конденсация водяного пара, который всегда присутствует в вакуумной системе как составная часть воздуха, и пар, выделяющийся со стенок камеры. При преждевременном охлаждении ловушки значительная часть водяного пара конденсируется на ее холодных стенках, поэтому последующая откачка сводится лишь к медленному его удалению.

§ 21. КРИОГЕННЫЕ НАСОСЫ

Криогенные насосы являются безмасляными средствами откачки и поэтому получили наибольшее распространение при нанесении тонких пленок.

Криогенные насосы позволяют создавать вакуум до 10^{-5} Па.

Принцип действия этих насосов основан на физических явлениях, происходящих при сверхнизких — криогенных (120–4 К) температурах: конденсации на охлажденных металлических поверхностях газов в твердое состояние и адсорб-

ции (поглощении) их твердыми охлажденными пористыми адсорбентами.

Наибольшее распространение получили криогенные насосы, охлаждаемые газовыми холодильными машинами — криогенераторами. Криогенные насосы (рис. 44) состоят из четырех основных элементов: криопанели 4, защитного экрана 8, корпуса 9 и системы охлаждения — криогенератора 1.

К р и о п а н е л ь 4 является активным (откачивающим) элементом насоса и представляет собой охлаждаемую до низких температур (около 20 К) металлическую поверхность, на которой происходит конденсация откачиваемых газов в твердое состояние.

Водород, выделяющийся из испаряемого материала в процессе нанесения пленки, при этой температуре не конденсируется и его удаляют адсорбцией. В качестве адсорбентов используют гранулы активированного древесного угля, приклеиваемые в виде тонкого слоя 3 к поверхности криопанели.

З а щ и т н ы й э к р а н 8, верхняя часть которого выполняется в виде шевронных жалюзи, окружает криопанель и служит для снижения теплового излучения на нее от находящихся при комнатной температуре стенок корпуса 9 насоса. Температура защитного экрана должна быть около 100 К.

К о р п у с 9 крионасоса служит для монтажа элементов насоса и представляет собой переходный цилиндрический патрубок с фланцем 7 для соединения с откачиваемым объемом 6 через уплотнительные прокладки 5.

К р и о г е н е р а т о р 1 является наиболее сложной частью криогенного насоса и служит для предварительного охлаждения криопанели и защитного экрана от комнатной температуры до рабочей и поддержания ее на этом уровне при работе. Принцип действия криогенератора основан на физическом эффекте, заключающемся в том, что при резком расширении сжатого газа его температура понижается. Криогенераторы имеют две ступени расширения рабочих газов:

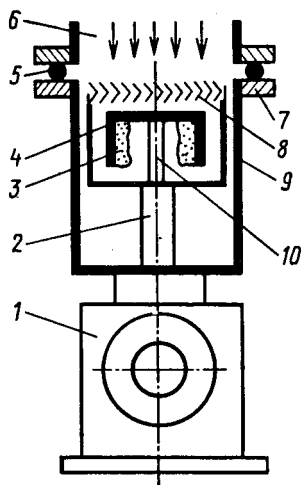


Рис. 44. Криогенный насос: 1 — криогенератор, 2, 10 — цилиндры первой и второй ступеней, 3 — слой адсорбента, 4 — криопанель, 5 — уплотнительная прокладка, 6 — откачиваемый объем, 7 — фланец, 8 — защитный экран, 9 — корпус

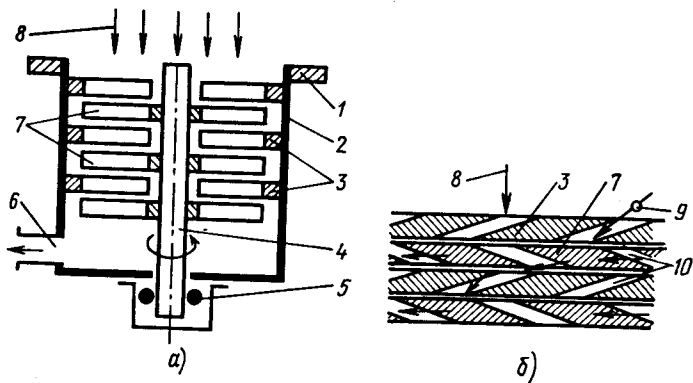


Рис. 45. Турбомолекулярный насос (а) и схема создания в нем направленного потока (б):

1, 6 – впускной и выпускной патрубки, 2 – корпус, 3, 7 – статорные и роторные диски, 4 – ротор, 5 – подшипник, 8, 9 – поток и молекула откачиваемого газа, 10 – радиальные прорези

первая служит для охлаждения защитного экрана до 100 К, а вторая – для охлаждения криопанели до 20 К.

При работе криогенного насоса газ из откачиваемого объема поступает (как показано на рисунке стрелками) через жалюзи защитного экрана 8 к криопанели 4 и конденсируется на ее внешней поверхности или поглощается порами адсорбента.

Перед включением криогенного насоса рабочую камеру предварительно откачивают механическим форвакуумным насосом до давления, приблизительно равного 2 – 2,5 Па. Затем при работающем механическом форвакуумном насосе включают криогенератор, время выхода которого на рабочий режим приблизительно равно 100 – 120 мин. После выхода на режим, т. е. охлаждения криопанели, начинается откачка крионасосом и форвакуумный насос отключают.

§ 22. ТУРБОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ НАСОСЫ

Турбомолекулярные насосы относятся к механическим высоковакуумным средствам откачки и их принцип действия основан на сообщении молекулам откачиваемого газа направленного движения поверхностью быстро вращающегося твердого тела. После соударения с этой поверхностью молекулы газа начинают двигаться преимущественно в направлении движения твердого тела, т. е. в направлении откачки.

Турбомолекулярные насосы позволяют создавать вакуум порядка 10^{-5} Па.

Турбомолекулярный насос (рис. 45, а) имеет цилиндрический корпус 2 с впускным 1 и выпускным 6 патрубками, по оси которого расположен опирающийся на подшипник 5 ротор 4. Внутри на стенках корпуса установлены неподвижные статорные диски 3, а в промежутках между ними располагаются закрепленные на роторе роторные диски 7. Зазор между дисками 3 и 7 примерно равен 1 мм. Частота вращения ротора 16 000 — 20 000 об/мин.

Чтобы понять принцип действия турбомолекулярного насоса, рассмотрим рис. 45, б, на котором показано несколько рядов роторных и статорных дисков с направленными под углом радиальными прорезями. Прорези статорных дисков являются как бы зеркальным отображением прорезей роторных дисков, поэтому образуются клинообразные каналы. При быстром вращении роторных дисков относительно статорных молекулы газа, ударяясь о стенки их прорезей, преимущественно движутся в направлении, показанном стрелками. Таким образом газ последовательно перемещается от одной пары дисков к другой, в чем и состоит откачивающее действие турбомолекулярного насоса. В насосе, показанном на рис. 45, а, газ перемещается сверху вниз, т. е. от входного патрубка к выходному.

Диски турбомолекулярных насосов выполняются в виде металлических шайб толщиной в несколько миллиметров. Каждая пара дисков создает относительно небольшое сжатие газа, но так как одновременно работает большое количество дисковых пар, достигается значительное суммарное сжатие. Несмотря на это, турбомолекулярные насосы не могут работать без предварительного разрежения, которое создается подсоединяемым к их выпускному патрубку 6 механическим форвакуумным насосом.

При эксплуатации турбомолекулярных насосов надо следить, чтобы в их полость не попали какие-либо твердые инородные частицы и предметы, что может привести к заклиниванию быстро вращающегося ротора и выходу насоса из строя.

§ 23. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

Давление в вакуумных установках для нанесения тонких пленок обычно составляет $10^2 - 10^{-5}$ Па.

В таком широком диапазоне измерять давления одним универсальным прибором невозможно. В настоящее время разработано большое количество приборов различных типов, принцип действия которых основан на зависимости того или

инного физического параметра газа от давления. Каждому из этих приборов соответствует определенный интервал давлений.

Приборы для измерения давлений ниже атмосферного, называемые *вакуумметрами*, состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительного устройства. Манометрический преобразователь (иногда называемый манометрической лампой) предназначен для преобразования измеряемого давления в пропорциональную ему электрическую величину (ток или напряжение) и подсоединяется непосредственно к вакуумной системе. Измерительное устройство служит для измерения этой величины с индикацией на шкале, проградуированной в единицах давления.

При нанесении тонких пленок используют тепловые, магнитные электроразрядные и ионизационные электронные вакуумметры. Области давлений, измеряемые этими вакуумметрами, приведены на рис. 46. Рассмотрим только принципы действия этих приборов, так как существует множество их разновидностей, а сведения по эксплуатации обычно приводятся в инструкции.

Тепловые вакуумметры основаны на пропорциональной зависимости теплопроводности газа от его плотности и подразделяются на приборы сопротивления и термопарные. Известно, что молекулы газа способны при движении переносить теплоту от нагретой нити, расположенной внутри вакуумного баллона, к его стенкам. Так как при понижении давления теплопроводность газа уменьшается, отдача теплоты нагретым телом также становится меньше.

В основе действия преобразователя вакуумметра сопротивления (рис. 47) лежит зависимость сопротивления металли-

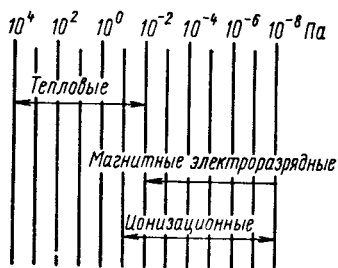


Рис. 46. Давления, измеряемые вакуумметрами

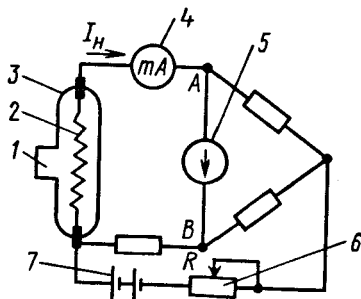


Рис. 47. Вакуумметр сопротивления: 1 — трубка, 2 — нить накала, 3 — стеклянный баллон, 4, 5 — миллиамперметры, 6 — переменный резистор, 7 — источник питания

ческой нити от температуры. Преобразователь представляет собой стеклянный баллон 3 с трубкой 1 для присоединения к вакуумной системе. В баллоне на двух вводах смонтирована металлическая нить накала 2, нагреваемая током, поступающим от источника питания 7.

Измерительная часть прибора представляет собой мост для измерения сопротивлений. Для регулировки и поддержания стабильным током накала в процессе измерений служит переменный резистор 6. Ток, проходящий через нить преобразователя, измеряют миллиамперметром 4, а ток, проходящий между точками А и В моста, — миллиамперметром 5, шкала которого проградуирована в единицах давления.

Термопарный вакуумметр (рис. 48) выполнен в виде стеклянного баллона 4 с трубкой 1 для присоединения к вакуумной системе и вмонтированной в него термопары 3 из тонких (около 0,05 мм) проволок, приваренных к подогревателю 2. Термопара и подогреватель соединены крестообразной перемычкой. В измерительную часть вакуумметра входят переменный резистор 7, милливольтметр 6 и миллиамперметр 8.

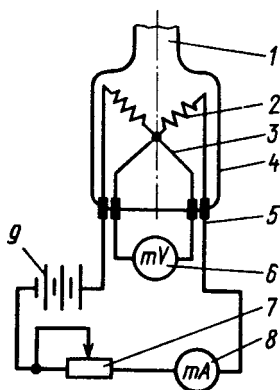


Рис. 48. Термопарный вакуумметр:

1 — трубка, 2 — подогреватель, 3 — термопара, 4 — стеклянный баллон, 5 — токовый ввод, 6 — милливольтметр, 7 — переменный резистор, 8 — миллиамперметр, 9 — источник питания

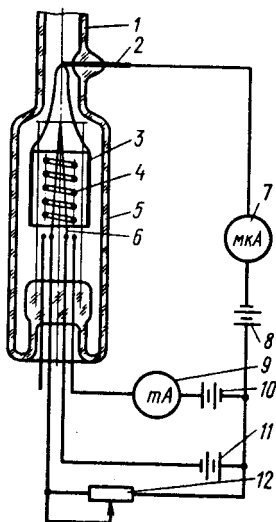


Рис. 49. Ионизационный вакуумметр:

1 — трубка, 2 — вывод коллектора, 3 — коллектор ионов, 4 — сетка, 5 — стеклянный баллон, 6 — катод, 7, 9 — микро- миллиамперметры, 8, 10, 11 — источники тока, 12 — переменный резистор

Подогреватель 2 нагревается током, который от источника питания 9 подается через токовый ввод 5, регулируется переменным резистором 7 и измеряется миллиамперметром 8. Спай термопары 3, нагреваемой подогревателем, служит источником эдс, которую измеряют милливольтметром 6.

Принцип действия термопарного вакуумметра состоит в том, что при понижении давления газа его теплопроводность уменьшается, а следовательно, повышается температура крестообразной перемычки и изменяется эдс, по значению которой, используя градуировочную кривую, определяют давление газа.

Однако, когда вакуум становится настолько высоким, что потеря теплоты обуславливается в основном только теплопроводностью и излучением металлической нити накала, показания вакуумметра перестают зависеть от давления.

Достоинства тепловых вакуумметров — простота конструкции, возможность применения для измерения давления любых газов и паров. Кроме того, они не реагируют на аварийное нарушение вакуума и практически имеют неограниченный срок службы. Недостатками таких вакуумметров являются инерционность и изменение во времени тока накала металлической нити, что требует их периодической регулировки.

Ионизационные вакуумметры (рис. 49) имеют преобразователь, принцип действия которого основан на прямой зависимости между давлением и током, образующимся в результате ионизации молекул остаточных газов.

Ионизационный преобразователь представляет собой стеклянный баллон 5 с трубкой 1 для присоединения к вакуумной системе, в который впаяны три электрода: катод 6, сетка 4 и коллектор ионов 3. Катодом 6, эмиттирующим электроны, служит вольфрамовая нить диаметром 0,1 мм, которая при нормальном токе накала, поступающем от источника 11, обеспечивает получение тока эмиссии электронов.

Сетка 4 в виде двойной спирали служит ускоряющим электродом (анодом) для электронного потока, эмиттированного катодом. Спираль сетки имеет сравнительно редкий шаг (3 мм при диаметре проволоки 0,2 мм) и крепится к двум выводам, поэтому хорошо обезгаживается при нагреве током. В рабочем режиме на сетку от источника 10 подается положительный относительно катода потенциал 200 В.

Коллектор ионов 3 в форме цилиндра закреплен на выводе 2, впаянном в верхнюю часть баллона. Такое расположение вывода обеспечивает высокую электрическую изоляцию между ним и остальными электродами, что необходимо при измерении ионных токов порядка долей микроампера. На коллектор от источника 8 подается отрицательное напряжение 25 В.

При работе ионизационного вакуумметра вольфрамовый катод испускает электроны, часть которых, двигаясь к сетке и пролетая сквозь нее, попадает в пространство, заключенное между ней и коллектором. Так как потенциал коллектора относительно катода отрицательный, электроны не попадают на него. В точке пространства с нулевым потенциалом электроны останавливаются и начинают движение в противоположном направлении — к положительно заряженной анодной сетке. Таким образом, вокруг анодной сетки происходит непрерывное колебание электронов: прежде чем попасть на анод, они совершают в среднем до пяти колебаний. При столкновении с электронами молекулы газа ионизируются. Образовавшиеся в результате этого положительные ионы собираются на находящемся под отрицательным потенциалом коллекторе, создавая в его цепи ионный ток, по значению которого судят о давлении остаточного газа в вакуумном объеме.

В измерительную часть прибора входят: цепь катода 6, состоящая из источника постоянного тока 11 и переменного резистора 12; цепь сетки 4, состоящая из источника постоянного тока 10 и миллиамперметра 9 (при этом сетка служит анодом); цепь коллектора ионов 3, состоящая из источника постоянного тока 8 и микроамперметра 7.

Для определения давления достаточно при заданном электронном токе измерить ионный ток в цепи коллектора микроамперметром 7, проградуированным в единицах давления.

Магнитные электроразрядные манометры (рис. 50) имеют преобразователь, принцип действия которого основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда, возникающего в скрещенных магнитном и электрическом полях (см. § 9), от давления. Электроразрядный преобразователь представляет собой металлический корпус — катод 2, внутри которого расположен выполненный в виде металлического кольца анод 3. Вся система помещена в поле постоянного магнита 4. Таким образом создаются скрещенные магнитное и электрические поля.

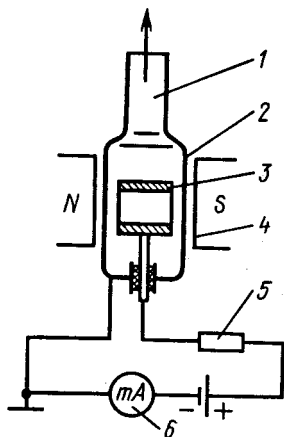


Рис. 50. Магнитный электроразрядный вакуумметр:

1 — трубка, 2 — катод, 3 — анод, 4 — постоянный магнит, 5 — балластный резистор, 6 — миллиамперметр

Чтобы понять, как работает такой преобразователь, рассмотрим физические явления, происходящие при изменении давления в вакуумной системе, к которой он присоединен.

Если вакуумная система и, следовательно, преобразователь откачаны до достаточно низкого давления, а к зажимам измерительной части вакуумметра подведено высокое постоянное напряжение, например 2 — 6 кВ, то между электродами преобразователя возникает тлеющий разряд. При этом электроны движутся по сложной удлинненной траектории и ионизируют за счет высокого рабочего напряжения газ, образуя ионный ток. Для стабилизации тлеющего разряда служит внешний (балластный) резистор 5, на котором в зависимости от значения разрядного тока происходит большее или меньшее падение напряжения.

Таким образом, с ростом разрядного тока напряжение между электродами преобразователя уменьшается и ток не может достигнуть опасного значения. При уменьшении разрядного тока, наоборот, напряжение между электродами возрастает и разряд поддерживается длительное время.

Микроамперметр 6, включенный в цепь измерительной части вакуумметра и служащий для измерения малых токов, проградуирован в единицах давления и позволяет по разрядному току определять давления в вакуумной системе.

§ 24. КОНТРОЛЬ СОСТАВА ОСТАТОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

При проведении технологических процессов нанесения тонких пленок следует контролировать не только вакуум в рабочей камере, но и состав остаточной атмосферы. Приборами для контроля состава остаточной атмосферы, называемыми *масс-спектрометрами*, в настоящее время оснащается любое вакуумное технологическое оборудование для нанесения тонких пленок.

Наиболее широкое применение получил масс-спектрометр квадрупольного типа, иногда называемый также электрическим фильтром масс (рис. 51). Датчик этого прибора представляет собой цилиндрический корпус 3 с фланцем 2 для подсоединения к вакуумному объему. Во входной части прибора расположен источник 1 ионов, которые образуются в результате бомбардировки молекул газов остаточной атмосферы ускоренными электронами и через диафрагму 4 проходят в анализатор. Четыре диагонально расположенных цилиндрических стержня 5 анализатора электрически соединены попарно.

Разделение ионов по массам в анализаторе масс-спектрометра происходит под действием квадрупольного электрического поля, создаваемого при подаче на цилиндрические стержни

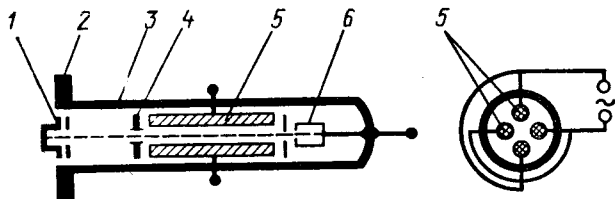


Рис. 51. Масс-спектрометр:

1, 6 — источник и коллектор ионов, 2 — фланец, 3 — корпус, 4 — входная диафрагма, 5 — стержни анализатора

переменного напряжения. Ионы, движущиеся вдоль оси анализатора, колеблются в высокочастотном поле, причем амплитуда колебаний зависит как от их массового числа, так и от напряжения на стержнях. Ионы, амплитуда колебаний которых оказывается меньше половины расстояния между двумя диаметрально расположенными стержнями, беспрепятственно проходят через квадрупольное поле. При этом можно так подобрать параметры высокочастотного поля, что в зависимости от подаваемого напряжения через фильтр будут проходить ионы только определенной массы.

Таким образом, при соответствующем переменном напряжении из общего ионного тока на коллектор 6 попадают только ионы определенной массы, которые проходят через анализатор и создают в цепи коллектора ток. Ионы других масс при движении вдоль анализатора совершают усиливающиеся колебания, попадают на стержни и нейтрализуются. Изменяя параметры переменного напряжения, можно анализировать массы различных ионов, составляющих атмосферу, и по ионному току на коллекторе судить о парциальных давлениях каждой составляющей.

§ 25. ОТКАЧНЫЕ ВАКУУМНЫЕ СИСТЕМЫ

Основным требованием, предъявляемым к откачным системам установок для нанесения тонких пленок, является обеспечение требуемого вакуума в рабочей камере при проведении технологического процесса. При нанесении тонких пленок методами термического испарения и ионного распыления используют два различных типа откачных вакуумных систем.

Особенностью термического испарения, которое производится при рабочем давлении порядка 10^{-4} Па, является резкое увеличение газовыделения при нагреве и испарении материала. Для компенсации газовыделения требуются насосы, обеспечивающие высокую быстроту действия в области высокого вакуума.

Особенностью ионного (магнетронного) распыления, которое производится при рабочем давлении порядка 10^{-1} Па, является необходимость предварительной откачки до высокого вакуума, а затем длительное поддержание среднего вакуума при значительном потоке инертного (аргона) и реактивных (кислорода, азота) газов.

Необходимо отметить, что при ионном распылении проблема загрязнения пленок примесями из остаточной среды более серьезна, чем при термическом испарении, так как часть молекул примесных газов ионизируется и диссоциирует, в результате чего они становятся химически более активными, чем соответствующие нейтральные молекулы. Поэтому для получения чистых пленок в рабочих камерах установок ионного распыления необходимо обеспечивать такой же низкий уровень активных примесных газов, как и в рабочих камерах высоковакуумных установок термического распыления. Таким образом, несмотря на то что ионное распыление ведется в области среднего вакуума, обслуживание откачных систем используемых установок довольно сложно.

К откачным системам установок относятся камера, вакуумные насосы и трубопроводы, запорно-коммутационная арматура и приборы для измерения вакуума. Процесс откачки состоит из трех этапов:

- удаления основной массы газа из объема рабочей камеры;
- обезгаживания элементов внутрикамерной технологической оснастки и внутренних стенок камеры;
- поддержания рабочего давления при нанесении тонких пленок.

На первом этапе вакуумный объем в основном откачивается форвакуумными механическими или двухроторными насосами до давления 1 Па.

Второй этап откачки (до давления 10^{-5} Па) связан с тем, что материалы, из которых изготовлены камеры и их внутренняя арматура, содержат значительные количества адсорбированных на поверхности и содержащихся внутри кристаллической решетки материала молекул газов. Для интенсивного удаления адсорбированных на поверхностях молекул газов необходимо снизить давление и повысить температуру. Удаление растворенных в толще материала молекул газов требует значительно большего времени, что связано с их диффузией между атомами металла.

При повышении температуры и одновременном понижении давления усиливается тепловое движение как атомов металла, так и растворенных в нем молекул газа, что способствует интенсификации обезгаживания рабочего объема. Обычно вакуум-

ные рабочие камеры нагревают горячей водой, пропускаемой через змеевик.

На третьем этапе откачной системой компенсируются газовыделения, происходящие при термическом испарении или ионном распылении осаждаемых материалов, и поддерживается необходимое рабочее давление.

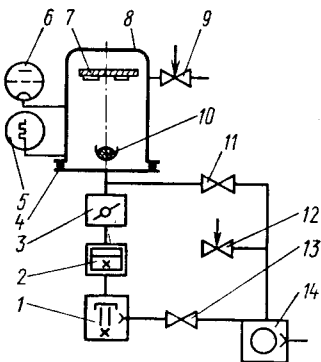
Принципы построения откачных систем рассмотрим на примере простейшей вакуумной системы установки нанесения пленок методом термического испарения (рис. 52).

При поднятом рабочем колпаке 8 загружают подложки на подложкодержатель и испаряемый материал в испаритель 10. При опускании колпака его фланец опирается на резиновую прокладку 4 и таким образом герметизируется. При форвакуумной откачке рабочей камеры до давления порядка 1 Па сначала включают механический форвакуумный насос 14, а затем для соединения с ним рабочего объема открывают клапан 11. Измеряют давление в рабочем объеме термопарным вакуумметром 5. Создав требуемый вакуум, открывают затвор 3 и клапан 13, закрывают клапан 11 и откачивают диффузионную магистраль насоса 1. После восстановления вакуума в системе, понизившегося за счет воздуха, находящегося в объеме диффузионного насоса 1 и его магистрали, включают этот насос, предварительно подав воду для охлаждения его корпуса. Одновременно начинают охлаждать жидким азотом ловушку 2. После достижения необходимого предельного разрежения порядка $5 \cdot 10^{-5}$ Па, которое измеряется ионизационным вакуумметром 6, приступают к проведению технологического процесса нанесения тонких пленок (обычно при рабочем давлении порядка 10^{-4} Па).

Окончив процесс на одних подложках, вынимают их и закладывают подлежащие обработке. Для этого впускают

Рис. 52. Вакуумная система и установка нанесения пленок методом термического испарения:

1 — паромасляный насос, 2 — азотная ловушка, 3 — высоковакуумный затвор, 4 — резиновое уплотнение, 5, 6 — термопарный и ионизационный преобразователи вакуумметров, 7 — подложка, 8 — рабочая камера, 9, 12 — натекатели, 10 — испаритель, 11, 13 — клапаны, 14 — форвакуумный насос



воздух в рабочий объем через натекаТЕЛЬ 9, закрыв затвор 3 и тем самым преградив допуск воздуха в диффузионный насос. В ином случае при открытом натекателе 9 воздух проникнет через затвор 3 в диффузионный насос, окислит масло и тем самым выведет насос из строя.

Поместив в рабочую камеру обрабатываемые подложки, снова откачивают ее форвакуумным насосом при открытом клапане 11. Затвор 3 и клапан 13 должны быть при этом закрыты, чтобы воздух из рабочего объема не попал в диффузионный насос и не вывел его из строя. В результате работающий диффузионный насос оказывается перекрытым сверху и снизу, т. е. работает вхолостую. При давлении в рабочем объеме порядка 5 Па клапан 11 закрывают, а затвор 3 и клапан 13 открывают, и начинается откачка рабочей камеры диффузионным насосом. После создания в ней давления 10^{-5} Па проводят процесс нанесения пленки на подложки.

Для выключения вакуумной системы при закрытых затворе 3 и клапане 11 и работающем форвакуумном насосе 14 выключают диффузионный насос. Когда его кипятильник охладится, закрывают клапан 13, выключают форвакуумный насос 14 и открывают для напуска атмосферного воздуха в его полость натекаТЕЛЬ 12.

Вакуумные системы любого типа имеют некоторые участки, недостаточно надежные в отношении герметичности. В первую очередь это места соединений отдельных элементов. Вероятность натекания вакуумной системы в местах соединений объясняется тем, что при работе они подвергаются механическому или температурному воздействию. Даже если все соединения выполнены достаточно тщательно, остается опасность, что участки, которые не подвергались опасному воздействию, могут иметь дефекты, не заметные на глаз, но являющиеся местом входа натекающего в систему атмосферного воздуха. Признак большой течи в вакуумной системе — невозможность создания требуемого вакуума.

Для оценки быстроты натекания (течи) получают предельный вакуум p_1 и изолируют вакуумную систему от насоса, закрыв затвор. Считая момент закрытия затвора начальным, через некоторое время τ измеряют давление p_2 в вакуумной системе. Зная объем V вакуумной системы над затвором, быстроту натекания (Па · л/с) определяют по формуле

$$Q_T = V(p_1 - p_2)/\tau. \quad (14)$$

Если быстрота натекания превышает допустимую, необходимо отыскать негерметичное место и устранить течь. Для обнаружения негерметичных мест существует ряд методов,

а также приборов, называемых *течеискателями*. Наибольшее распространение получил гелиевый течеискатель, основой которого являются масс-спектрометр, реагирующий на присутствие ничтожного количества гелия в его вакуумной системе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы основные параметры вакуумных насосов?
2. Как работают механические форвакуумные, вращательные пластинчато-роторные и двухроторные насосы?
3. Каковы принципы действия высоковакуумных диффузионных, криогенных и турбомолекулярных насосов?
4. Какие вакуумметры применяют для измерения низкого вакуума и каковы их принципы действия?
5. Как работают ионизационный и магнитный электроразрядный вакуумметры и какое давление ими измеряют?
6. Каковы назначение и принцип действия масс-спектрометра?

ГЛАВА ШЕСТАЯ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

§ 26. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Вакуумные установки для нанесения тонких пленок разнообразны по конструкции, однако имеют ряд общих элементов (рис. 53). Промышленностью выпускаются вакуумные установки разных моделей, отличающиеся устройством внутрикамерной оснастки, степенью автоматизации и оснащенностью аппаратурой для измерения параметров технологического процесса.

Одним из важнейших параметров вакуумных установок является производительность Q , которая при их бесперебойной работе определяется количеством изделий (подложек), обрабатываемых в единицу времени (шт/ч),

$$Q = 1 / (\tau_p + \tau_x), \quad (15)$$

где τ_p — время технологического воздействия на подложку (рабочее); τ_x — вспомогательное время (холостое).

Рабочее время τ_p складывается из времени предварительного нагрева подложки τ_n , времени нанесения пленки $\tau_{п}$ и времени охлаждения τ_o подложки перед разгерметизацией камеры:

$$\tau_p = \tau_n + \tau_{п} + \tau_o. \quad (16)$$

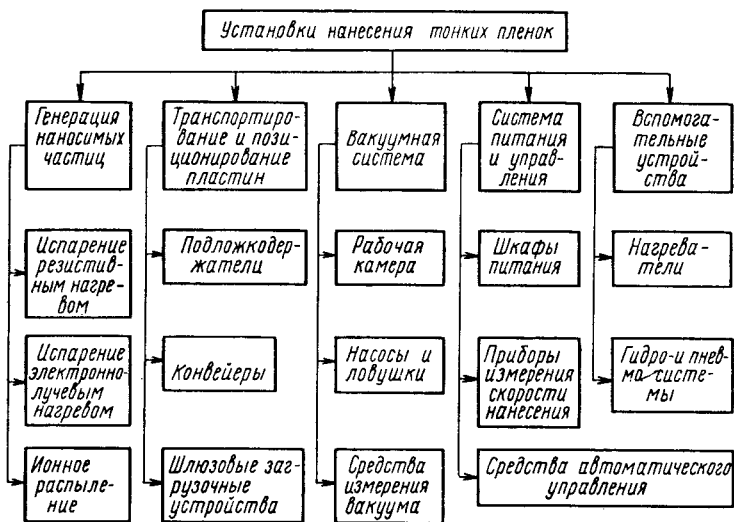


Рис. 53. Конструктивно-технологическая схема установок для нанесения тонких пленок

Холостое время τ_x складывается из времени напуска воздуха в рабочую камеру и ее открытия τ_k , времени загрузки подложек τ_3 и времени откачки рабочей камеры τ_b :

$$\tau_x = \tau_k + \tau_3 + \tau_b. \quad (17)$$

Рабочее время определяется особенностями технологического процесса и не может быть уменьшено. Поэтому для повышения производительности установок сокращают, а в некоторых случаях и совмещают составляющие, входящие в холостое время.

В зависимости от вида производства, а также требований производительности различают три типа установок:

периодического действия, используемые в мелкосерийном производстве, а также для отработки технологических процессов;

полунепрерывного действия, используемые в серийном производстве с относительно частой сменой технологического процесса;

непрерывного действия, используемые в крупносерийном и массовом производстве.

§ 27. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Вакуумные установки периодического действия имеют только одну рабочую камеру, в которой периодически проводятся все стадии технологического процесса: загрузка обрабатываемых подложек, откачка рабочей камеры, предварительная обработка подложек (нагрев, очистка), нанесение пленки, напуск воздуха до атмосферного давления, выгрузка подложек.

Эти установки в настоящее время наиболее распространены в промышленности, так как они просты по конструкции, легко переналаживаются и довольно дешевы. К тонким пленкам, наносимым на этих установках, предъявляют невысокие требования по уровню воспроизводимости технических параметров.

Производительность установки периодического действия невелика, так как перед каждой очередной загрузкой партии подложек в рабочую камеру напускают атмосферный воздух, после чего ее откачивают до высокого вакуума для проведения следующего технологического цикла. Кроме того, при напуске

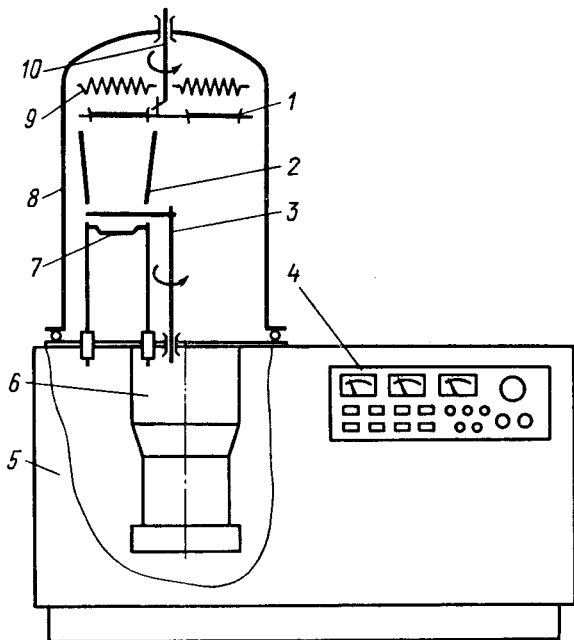


Рис. 54. Вакуумная установка с цилиндрической вертикальной рабочей камерой:

1 — подложкодержатель, 2 — экран, 3 — заслонка, 4 — пульт управления, 5 — каркас, 6 — насос, 7 — испаритель, 8 — рабочая камера, 9 — нагреватель, 10 — ввод вращения

воздуха на стенках рабочей камеры конденсируется влага, что приводит к загрязнению пленок при следующем технологическом процессе.

В зависимости от компоновки различают установки с вертикальной или горизонтальной цилиндрической рабочей камерами и с кубической.

Вакуумная установка с цилиндрической вертикальной рабочей камерой показана на рис. 54. Выполненная в виде колпака 8 рабочая камера установлена над базовой плитой, к которой снизу монтируется откачная система 6. Под колпаком располагаются технологические устройства — испаритель 7, экран 2, нагреватель 9, подвижная заслонка 3, подложкодержатель 1 с подложками и привод 10 его вращения. Для поднятия колпака служит подъемное устройство. Диаметр колпаков от 300 до 700 мм. Установка монтируется на каркасе 5, на котором располагается также панель управления 4.

Эти установки устарели, однако, несмотря на низкую производительность, до сих пор используются в некоторых цехах и лабораториях.

Вакуумная установка с горизонтальной цилиндрической рабочей камерой диаметром 600 мм показана на рис. 55. Спереди рабочая камера 8 закрывается крышкой 2, на которой размещается быстросъемный барабан 5, служащий для загрузки

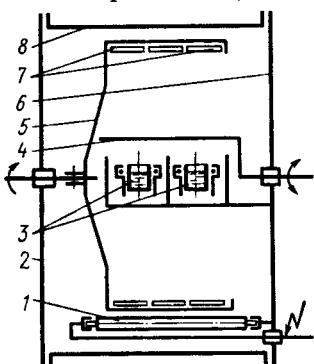


Рис. 55. Внутрикамерное устройство установки с горизонтальной цилиндрической рабочей камерой:

1 — нагреватель, 2, 6 — передняя и задняя крышки, 3 — испарители, 4 — заслонка, 5 — барабан, 7 — держатель подложки, 8 — рабочая камера

60 держателей 7 подложек и масок. При нанесении пленок барабан вращается электромеханическим приводом с частотой 30 об/мин.

На задней крышке 6 рабочей камеры установлены на кронштейне два испарителя 3, выполненные в виде единого блока с механической заслонкой 4 и нагревателем 1 мощностью 4 кВт. Системы питания и управления выполнены в виде отдельного шкафа, который размещается справа от установки и соединяется с ней гибкими кабелями.

Вакуумная установка с кубической рабочей камерой и передней дверцей имеет откачную систему,

находящуюся сзади. Испарительные или расплывательные устройства располагаются на дне рабочей камеры, а подложкодержатели — в ее верхней части.

Размеры камеры 600х600х700 мм. Такие установки очень удобны для встраивания в "чистые" комнаты и широко используются в производстве полупроводниковых ИМС.

Установка 01НЭ-7-004 с кубической рабочей камерой (рис. 56) предназначена для нанесения пленок электронно-лучевым испарением осаждаемых материалов из водоохлаждаемых медных тиглей.

С наружной стороны рабочей камеры 8, смонтированной в каркасе 4 установки, приварены трубки, по которым подается холодная вода при ее работе или горячая при обезгаживании, а также напуске воздуха (для снижения конденсации паров воды из атмосферы на внутренних стенках камеры). В открывающейся на петлях двери имеется смотровое окно. В верхней части камеры размещены кварцевый датчик 7 для измерения толщины наносимой пленки и карусель с тремя планетарными подложкодержателями 9, а в нижней — два электронно-лучевых испарителя 11 и две заслонки 10 с электромагнитным приводом, а также нагреватели и датчик температуры подложек.

В качестве высоковакуумного средства откачки служит паромасляный насос 3, имеющий быстроту действия 9000 л/с, соединенный для создания предварительного вакуума с механическим форвакуумным насосом 1. Для уменьшения миграции масла в рабочую камеру на форвакуумном трубопроводе, а также на входном патрубке паромасляного насоса установлены соответственно азотные ловушки 2 и 5.

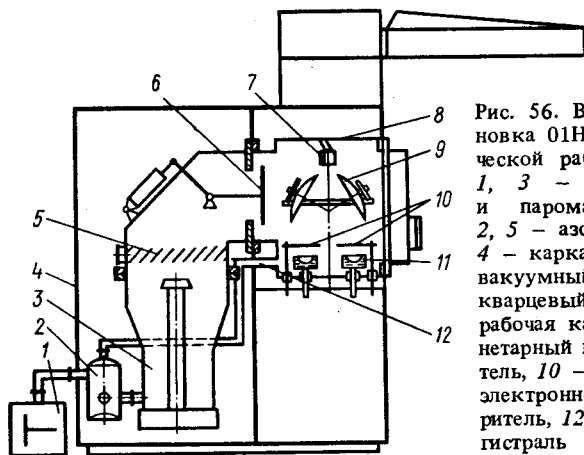


Рис. 56. Вакуумная установка 01НЭ-7-004 с кубической рабочей камерой: 1, 3 — форвакуумный и паромасляный насосы, 2, 5 — азотные ловушки, 4 — каркас, 6 — высоковакуумный затвор, 7 — кварцевый датчик, 8 — рабочая камера, 9 — планетарный подложкодержатель, 10 — заслонка, 11 — электронно-лучевой испаритель, 12 — обводная магистраль

Высоковакуумная откачка рабочей камеры производится в два этапа: вначале через обводную магистраль 12, а затем открывается высоковакуумный затвор 6. Высоковакуумный затвор служит для герметичного перекрытия паромасляного насоса при напуске атмосферы в рабочий объем и работает от пневмопривода, на корпусе которого расположены два микропереключателя, сигнализирующие об открытии или закрытии затвора.

В вакуумной системе имеются два натекатели с электромагнитным приводом, один из которых соответственно служит для напуска атмосферы в рабочую камеру и в механический насос после его отключения. Для измерения низкого и высокого вакуума используют соответственно термопарный вакуумметр и установленный на фланце рабочей камеры магнитный электроразрядный преобразователь.

Три подложкодержателя 9 связаны обоймой, могут вращаться как вокруг собственной оси, так и внутри камеры. Таким образом, каждой подложке сообщается сложное планетарное движение, обеспечивающее необходимую равномерность толщины наносимой пленки и хорошее покрытие ступенек сложного рельефа.

Блоки питания и управления электронно-лучевыми испарителями (для каждого испарителя отдельно), а также механизмами внутрикамерного устройства, вакуумной откачной системой и технологическим циклом нанесения пленок расположены в отдельных шкафах.

При работе установки 01НЭ-7-004 помещают в рабочую камеру 8 три подложкодержателя 9 с подложками и откачивают ее до высокого вакуума, после чего начинает вращаться планетарный механизм с подложками, включаются нагреватели подложек и оба шкафа питания испарителей. После нагрева подложек до заданной температуры и выдержки их при этой температуре включается накал катода каждого испарителя и выводится их ток эмиссии на заданное значение, достаточное для разогрева и обезгаживания испаряемых материалов. Время обезгаживания устанавливается с помощью реле времени. Во время обезгаживания луч испарителя сканирует по продольной оси тигля для разгона шлаков из зоны испарения. Вначале испарение производится на заслонку, которая после разгона шлаков открывается, и пленка наносится на подложки.

В процессе нанесения пленки может быть сохранено сканирование луча для увеличения поверхности испарения или он может быть остановлен в центре тигля для испарения материала из наиболее чистой зоны. При заданном времени процесса нанесения пленки одновременно с открыванием заслонки испарителя запускается реле времени работы данного испарителя.

Для нанесения пленки в виде сплава из двух испарителей заслонки одновременно открываются и закрываются по команде реле времени или сигналу кварцевого измерителя толщины пленки.

После отключения обоих испарителей нагрев подложек отключается и счетчик начинает отсчитывать время их остывания. Затем включается световой сигнал "Конец цикла" и на 10 с — звуковой сигнал, также предупреждающий о том, что цикл нанесения пленки окончен. Толщина пленки зависит от времени ее нанесения при заданных напряжениях и токе испарителя.

Установка 01НЭ-7-004 может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме.

В ручном режиме оператор управляет подачей в камеру горячей и холодной воды, работой вакуумной системы, вращением планетарного механизма, нагревом подложек, подачей на испарители высокого напряжения, токов прогрева и испарения, действием заслонок испарителей, выбором их режимов работы, а также аварийно отключает испарители и нагрев подложек при нажатии на кнопку "Стоп".

Установка имеет блокировки, обеспечивающие следующие виды защиты: персонала — от поражения электрическим током; испарителей — от прогорания тигля при отсутствии охлаждающей воды; элементов камеры — от попадания на них луча при отклонении тока электромагнита от заданного значения; нагревателей подложек — от увеличения давления в рабочей камере.

Для управления элементами вакуумной системы и испарителями в ручном режиме служат кнопки, размещенные на их пультах управления.

В автоматическом режиме последовательность срабатывания исполнительных устройств и механизмов определяется циклограммой, заложенной в блок управления установки.

Техническая характеристика установки 01НЭ-7-004 приведена ниже.

Производительность, подложек/цикл, при их диаметре, мм:

60	117
102	42

Диаметр обрабатываемых подложек, мм	60, 76, 102
Скорость осаждения, мкм/с.	$(3,5 \div 4) \cdot 10^{-3}$
Предельное остаточное давление, Па	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Время достижения остаточного давления $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па, мин	20
Количество испарителей	2

Мощность каждого испарителя, кВт.	12
Мощность нагревателя, кВт.	7
Максимальная температура нагрева подложек, °С	400
Частота вращения, об/мин:	
карусели	20
подложкодержателей	60
Неравномерность толщины пленки, %	1,5 — 2

§ 28. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Вакуумные установки полунепрерывного действия обычно имеют шлюзовую и рабочую камеры, разделенные затвором. В этом случае производится откачка только шлюзовых камер небольшого объема, что повышает производительность установок, так как исключается непроизводительное время их периодической откачки до высокого вакуума.

Так как для создания в рабочей камере вакуума порядка 10^{-4} — $5 \cdot 10^{-5}$ Па необходимо 1,5 — 2 ч (даже при разогретом диффузионном насосе), а время нанесения одного слоя обычно не превышает 1—1,5 мин, в вакуумных установках применяют шлюзовые камеры, позволяющие, не нарушая вакуума (за один вакуумный цикл), последовательно или одновременно обрабатывать несколько партий подложек. При этом в шлюзовой камере размещается только сменный подложкодержатель с подложками, а технологическая оснастка (в том числе устройства испарения или ионного распыления) все время находится в условиях вакуума. Кроме увеличения производительности такой принцип работы установок способствует повышению воспроизводимости параметров наносимых тонких пленок, так как рабочая камера не сообщается с атмосферой.

Наиболее производительными установками полунепрерывного действия являются многопозиционные установки карусельного типа, например 01НИ-7-006 (рис. 57), предназначенные для нанесения двухслойных пленок методом магнетронного распыления. Эти карусельные установки созданы на базе планарного магнетрона с кольцевой зоной эрозии, имеют рабочую камеру, откачную систему и шкаф управления и позволяют последовательно обрабатывать партии подложек в едином цикле. Все технологические операции, кроме загрузки и выгрузки подложкодержателей и установки на них подложек, автоматизированы.

Установка 01НП-7-006 имеет размещенные в общей рабочей камере четыре рабочие позиции: загрузки—разгрузки планетарных подложкодержателей; нагрева подложек; первого и

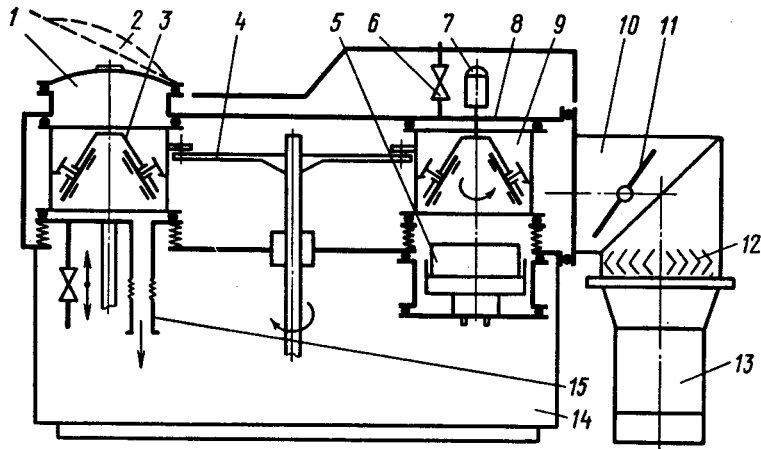


Рис. 57. Вакуумная установка полунепрерывного действия:

1 — шлюзовая камера, 2 — откидная крышка, 3 — планетарный подложкодержатель, 4 — карусель, 5 — магatron, 6 — натекатель, 7 — механический привод, 8 — рабочая камера, 9 — камера распыления, 10 — откачная система, 11 — высоковакуумный затвор, 12 — азотная ловушка, 13 — паромасляный насос, 14 — каркас, 15 — патрубок

второго распыления. Подъемная крышка рабочей камеры 8 обеспечивает доступ к внутрикамерным устройствам для их обслуживания, ремонта и очистки. Обработка подложек производится на планетарном подложкодержателе 3 с двумя осями вращения, который последовательно переводится с позиции на позицию пошаговым поворотом карусели 4 на 90° пневмоприводом.

На первой позиции подложкодержатели загружают через откидную крышку 2 и шлюзовую камеру 1, а затем откачивают ее форвакуумным насосом, подсоединенным к патрубку 15.

На второй позиции подложки нагревают с помощью кварцевых ламп.

На третьей и четвертой позициях, являющихся камерами распыления 9 и имеющих одинаковую конструкцию, на нагретые подложки с помощью магatronов 5 последовательно наносят два слоя пленки.

Малый диффузионно-щелевой зазор между позициями нанесения пленок и общей рабочей камерой обеспечивает необходимый перепад давлений при напуске через натекатель 6 рабочего газа (аргона) непосредственно в зону разряда.

Для эффективного нагрева подложек, а также равномерности нанесения пленок на трех рабочих позициях установки предусмотрено вращение планетарных подложкодержателей

механическим приводом 7. После окончания рабочего цикла каждый подложкодержатель возвращается на первую позицию в шлюзовую камеру, где его выгружают.

Поворот карусели на шаг происходит только после того, как затвор шлюзовой камеры 1 и механизм вакуумной блокировки камеры распыления 9 опустятся вниз, соединяя их объемы с общей рабочей камерой 8.

Откачная система 10 с паромасляным диффузионным насосом 13 расположена с задней стороны рабочей камеры. Для предохранения рабочего объема от паров масла между диффузионным насосом 13 и высоковакуумным затвором 11 находится азотная ловушка 12.

Автоматическое управление установкой осуществляется программатором и обеспечивает стабилизацию тока разряда по давлению рабочего газа, последовательность работы механизмов и напуск газа в шлюзовую камеру.

При работе установки рабочая камера с помощью диффузионного насоса и вымораживающей азотной ловушки откачивается до давления не выше $1,33 \cdot 10^{-2}$ Па (10^{-4} мм рт. ст.). После этого при наличии в системе охлаждения камеры холодной воды включается нагреватель и подложки ускоренно разогреваются до заданной температуры.

При создании необходимого вакуума в рабочей камере и подаче аргона включаются магatronы на позиции распыления. Для получения качественных пленок и устойчивой работы магatronов используют только химически чистый и осушенный аргон. Скорость осаждения пленки на подложки зависит от мощности магatronов, а при заданном стабилизируемом напряжении их питания также от тока, который, в свою очередь, определяется давлением аргона на рабочей позиции.

Наибольшую скорость распыления получают при давлении аргона $6,65 \cdot 10^{-1} - 2,66 \cdot 10^{-1}$ Па ($5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.). Для поддержания оптимальной скорости распыления рекомендуется работать при напряжениях от 370 до 460 В и токах от 7,5 до 12 А. При заданном напряжении питания ток магatronов поддерживается с помощью блоков стабилизации тока разряда изменением на позициях распыления давления аргона, который подается с помощью электромагнитного натекавателя 6. Толщина пленки определяется временем ее нанесения при заданной мощности магatronа.

На позиции перегрузки каждый раз после окончания времени цикла в шлюзовую камеру во избежание окисления нанесенной пленки подается азот и после этого через заданное время включаются звуковая и световая сигнализации, предупреждающие оператора о необходимости перегрузки. После перегрузки

подача азота прекращается и при закрытой крышке 2 шлюзовой камеры форвакуумный насос откачивает ее до давления не выше $1,33 \text{ Па}$ (10^{-2} мм рт. ст.). Затем через обводной клапан малого сечения при закрытом форвакуумном клапане шлюзовая камера откачивается до давления, близкого к давлению в рабочей камере. По окончании времени цикла затворы шлюзовой и распылительных камер опускаются вниз, сообщая их с рабочей камерой, а механизм перемещения передвигает карусель с позиции на позицию. После этого затворы шлюза и распылительных камер поднимаются вверх и вновь на каждой позиции выполняются рассмотренные операции.

Установка 01НИ-7-006 предназначена для работы в автоматическом режиме. В ручном режиме для подготовки автоматического режима опробуются ее механизмы: запускаются насосы, откачивается рабочая камера, включаются вращение карусели и нагрев подложек, выбираются и подаются напряжение и токи на магратроны.

Техническая характеристика установки 01НИ-7-006 приведена ниже.

Производительность, подложки/ч	150 (для $\phi 76 \text{ мм}$)
Размер подложек, мм	76–100
Количество позиций, шт.	4
Количество наносимых слоев	2
Предельный вакуум, Па	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Быстрота откачки насосов, л/с:	
диффузионного	3500
форвакуумных	18
Мощность нагревателя подложек, кВт	3
Ток нагревателя подложек, А	$17,5 \pm 1,5$
Температура подложек, $^{\circ}\text{C}$	400
Мощность магратрона, кВт	3
Напряжение, В	400–600
Равномерность толщины пленки	$\pm 5\%$

§ 29. ВАКУУМНЫЕ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Установки непрерывного действия отличаются тем, что обычно имеют несколько камер, а также входной и выходной шлюзы, позволяют исключить влияние откачной системы на цикловую производительность и обеспечивают однородные и стабильные условия процесса нанесения пленок. В настоящее время эти установки получают все большее распространение.

Вакуумные установки поточного типа с непрерывным

перемещением подложек и поштучной их загрузкой работают по принципу из кассеты в кассету. Типичным представителем таких установок является установка УВНМЭ-100/125-003, созданная на базе трех планарных магнетронов с овально-протяженной зоной эрозии мишени.

Основными частями установки являются: рабочая камера, размещенная на каркасе; агрегаты высоковакуумной откачки и откачки шлюзов; нагреватель и устройство транспортирования; шкафы питания магнетронов, управления очисткой и установкой в наладочном и ручном режимах, а также по восьми запрограммированным технологическим процессам в автоматическом режиме.

В шкафу управления имеются дисплей и микропроцессор на основе ЭВМ "Электроника-60", которая управляет транспортированием и нагревом подложек, напуском аргона в зоны распыления и травления, режимами работы трех магнетронов, шлюзовых устройств, а также ведет счет пластин, обеспечивает контроль всех систем и блокировку при отказе какой-либо из них.

Установка (рис. 58) выполнена в линейном варианте. В рабочей камере 4 из нержавеющей стали размещен конвейер

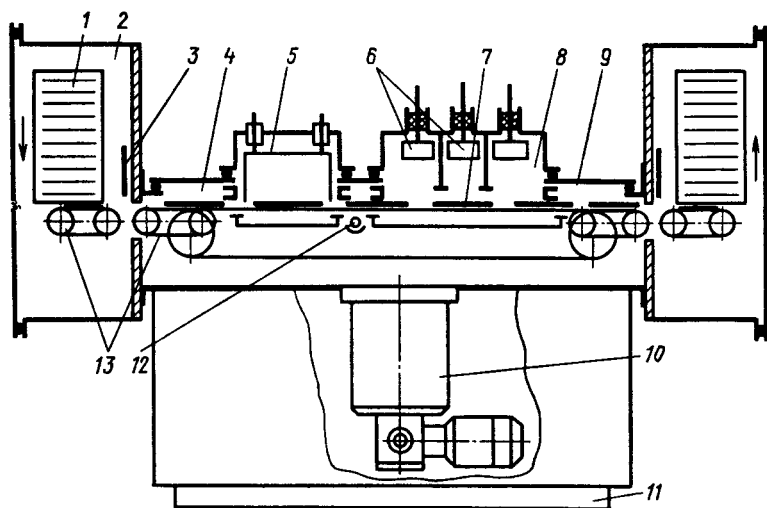


Рис. 58. Установка непрерывного действия:

1 — кассета, 2 — входной шлюз, 3 — затвор, 4 — рабочая камера, 5 — ВЧ-источник, 6 — магнетрон, 7 — подложка, 8 — камера, нанесения пленки, 9 — крышка, 10 — криогенный насос, 11 — каркас, 12 — нагреватель, 13 — конвейер

ер 13. Крышка 9 сверху камеры обеспечивает доступ к внутри-камерным устройствам для их обслуживания, ремонта и периодической очистки. Одновременно она служит для размещения ВЧ устройства 5 ионной очистки подложек и трех магнетронов 6, расположенных в камере распыления 8 с вакуумной блокировкой.

Устройства ионной очистки и магнетроны оснащены натекателями для напуска рабочих газов. Так как давление и состав атмосферы в рабочей камере 4 и камере распыления 8 различны, они для прохождения цепей конвейера соединяются друг с другом каналами, имеющими малую пропускную способность для газовых потоков. Это обеспечивает перепад давлений в камерах на два порядка. При давлении аргона $1,3 \text{ Па}$ в камере распыления в рабочей камере поддерживается давление $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Шлюзовая система выполнена в виде двух расположенных на торцевых сторонах рабочей камеры входного 2 и выходного шлюзов. Каждый шлюз оснащен щелевым вакуумным затвором 3, отделяющим его от рабочей камеры 4, и столом для размещения пустой и заполненной подложками кассет. Загружают и выгружают кассеты вручную через двери в шлюзовых камерах. При загрузке подлежащие обработке подложки 7 устанавливаются в кассете в шлюзовой загрузочный механизм шагового действия и поштучно подаются на конвейер 13 через шлюзовую затвор 3. Привод конвейера, выполненного в виде цепи из нержавеющей стали, расположен снаружи выходного шлюза.

Распыление осаждаемых материалов происходит сверху вниз при непрерывном движении подложек. После нанесения пленок подложки попадают в выходной шлюз и последовательно укладываются в приемную транспортную кассету.

Патрубок в средней части камеры служит для подсоединения высоковакуумного откачного агрегата, состоящего из криогенного насоса 10, затвора ДУ-400 и клапанов ДУ-63 на магистрали форвакуумной откачки криогенного насоса. Для форвакуумной откачки криогенного насоса, рабочей камеры и шлюзов служит двухроторный агрегат АВР-50, над которым расположена азотная ловушка.

При работе установки в автоматическом режиме включаются агрегат форвакуумной откачки АВР-50 и азотная ловушка на форвакуумной магистрали. При закрытом высоковакуумном затворе включается также форвакуумная откачка полости криогенного насоса (открыты форвакуумные клапаны крионасоса и общий). При давлении в полости криогенного насоса $6,7 \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$) его форвакуумные и общий

клапаны закрываются, запускается форвакуумная откачка рабочей камеры и включается сам криогенный насос.

После запуска форвакуумной откачки рабочей камеры при закрытом высоковакуумном затворе открываются затворы шлюзов, соответствующие форвакуумные клапаны, а также общий форвакуумный клапан и откачка идет через затворы шлюзов. При заданном давлении форвакуумная откачка рабочей камеры автоматически прекращается, затворы шлюзов закрываются, отсекая их от рабочей камеры. Одновременно закрываются клапаны форвакуумной откачки шлюзов. Криогенный насос выходит на рабочий режим в течение 70 мин после включения. По истечении этого времени открывается высоковакуумный затвор и рабочая камера откачивается криогенным насосом до высокого вакуума.

Далее начинается рабочий цикл установки, при котором подложки из кассеты шлюза загрузки поочередно укладываются на конвейер без разрыва их ряда. Двигаясь вместе с конвейером, подложки проходят очистку в устройстве ВЧ-травления, нагреваются с тыльной стороны, оказываясь над нагревателем 12, и с помощью магратронов на них наносится пленка. Мощность каждого магратрона, а следовательно, и толщину наносимых слоев можно регулировать отдельно. После нанесения пленок подложки автоматически укладываются в приемную кассету в шлюзе выгрузки.

Когда последняя подложка из шлюза загрузки попадает на конвейер, кассета автоматически опускается вниз, затвор шлюза загрузки закрывается, отсекая его от рабочей камеры. После этого в шлюз загрузки напускается газ до атмосферного давления, поступает команда о замене пустой кассеты кассетой с новой партией подложек и оператор закрывает дверь шлюза. Шлюз через два форвакуумных клапана начинает откачиваться до давления 1,3 Па (10^{-3} мм рт. ст.), затем закрываются форвакуумные клапаны, открывается затвор шлюза и начинается подача подложек на конвейер.

Во время перегрузки кассет (в течение 2 — 4 мин) и последующей откачки шлюза конвейер продолжает двигаться, но подложки, естественно, на него не поступают. Таким образом на конвейере образуется разрыв ряда движущихся подложек. Когда этот разрыв подходит к шлюзу выгрузки, автоматически подается команда об окончании выгрузки и закрывается затвор шлюза выгрузки. В шлюз выгрузки напускается воздух до атмосферного давления и включается сигнализация о необходимости провести перегрузку. Оператор открывает дверь шлюза, вынимает кассеты с пластинами, ставит пустую приемную кассету и закрывает дверь. При этом шлюз через два

форвакуумных клапана откачивается до давления 1,3 Па (10^{-2} мм рт. ст.). Затем закрываются форвакуумные клапаны, открывается затвор шлюза выгрузки, который оказывается подготовленным к приему очередной партии подложек, и работа установки продолжается.

При отказе микропроцессорной системы управления работу на установке можно довести до конца в ручном режиме.

При переналадке установки на работу с подложками другого диаметра заменяют цепи в конвейере и используют соответствующие для них кассеты.

Техническая характеристика установки УВНМЭ-100/125-003 приведена ниже.

Производительность, подложек/ч	100
Диаметр подложек, мм	76–125
Неравномерность толщины пленки, %	± 3
Мощность магнетрона, кВт	6
Напряжение, В	300–700
Предельное остаточное давление в рабочей камере, Па	$5 \cdot 10^{-5}$
Давление в камере распыления, Па	$(2-8) \cdot 10^{-1}$
Давление в шлюзах, Па	10
Мощность устройства ВЧ-очистки, кВт	0,3
Глубина очистки, нм	10
Мощность нагревателя, кВт	1
Температура подложек, °С	350

§ 30. МИКРОПРОЦЕССОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТАНОВКАМИ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Как видно из описания установок нанесения тонких пленок, они состоят из различных агрегатов и функциональных устройств и поэтому являются сложными объектами управления. Кроме того, технологические операции нанесения тонких пленок на этих установках характеризуются прецизионностью, что предопределяет исключение любых неконтролируемых побочных явлений, которые могут возникнуть в процессе обработки. Известно, что при ручном управлении установками подавляющая доля потерь в условиях производства появляется из-за ошибок оператора.

В настоящее время автоматизация управления новыми установками, основанная на микропроцессорной технике, исключает утомительный монотонный труд и соответственно ошибочные несанкционированные действия оператора.

Микропроцессорные системы управления (МПСУ) установками нанесения тонких пленок обеспечивают:

поддержание необходимых технологических режимов, непосредственно влияющих на электрофизические параметры пленок и способствующих повышению их качества (скорости осаждения, воспроизводимости толщины и свойств пленок; предварительной очистки подложек; подачи газов; стабилизации рабочего давления и состава вакуумной среды);

создание условий эффективного процесса обработки (нагрева подложек, обезгаживания внутривакуумных стенок камеры, охлаждения, откачки, энергоснабжения);

выполнение вспомогательных функций (загрузки, шлюзования и межоперационного транспортирования подложек; защиты обслуживающего персонала и оборудования; диагностики состояния установок).

Возможность выполнения этих задач определяется структурой систем управления, а также технических (аппаратных) средств их реализации и связями между ними. Структурная схема технических средств МПСУ включает:

микропроцессорные устройства управления (программируемые логические и регулирующие контроллеры, контроллеры смешанного типа, микроконтроллеры), а также аналоговые регуляторы и "жесткие" логические контроллеры;

датчики параметров функциональных устройств и обрабатываемых изделий с нормирующими преобразователями сигналов, вводимых в устройства микропроцессорного управления;

преобразователи и усилители мощности для передачи управляющих воздействий от устройства управления на исполнительные механизмы;

устройства ввода и отображения информации, соответственно обеспечивающие задание программы управления и параметров технологического процесса, а также его контроль и состояние отдельных устройств оборудования.

Различают два вида построения систем управления: централизованные и децентрализованные (распределенные).

В системах централизованного управления информация обрабатывается микроЭВМ. При этом технические средства системы управления располагаются в блоке управления, а датчики и исполнительные элементы — на установке (объекте управления). При поступлении сигналов с датчиков блок управления в соответствии с программой формирует управляющие воздействия на исполнительные механизмы. Достоинство централизованных систем — возможность управления различными установками с помощью ограниченного комплекта аппаратных средств, а основной недостаток — отсутствие гарантии безопасной работы установки.

В распределенных системах каждый агрегат установки управляется отдельным контроллером, который полностью или частично расчленяет функции управления технологическим процессом. Связь между контроллерами, а также управление установкой осуществляются блоком управления.

Достоинство этой системы состоит в том, что контроллеры и блок управления по конструкции проще, чем используемые в централизованной системе.

Современный этап развития централизованных и децентрализованных систем управления оборудованием характеризуется широкой номенклатурой применяемых аппаратных средств.

При микропроцессорном управлении оборудованием оператор использует только устройство ввода-вывода информации: мнемосхемы и клавиатуру с дисплеем.

Мнемосхемы являются простейшими устройствами отображения информации, обычно располагаются на передней панели установок и на них с помощью ламп накаливания или светодиодов отображается состояние функциональных устройств и механизмов.

Клавиатура служит для ввода и вывода необходимой информации с отображением на дисплее.

Символьные (алфавитно-цифровые) дисплеи обеспечивают широкие возможности отображения как текущих данных, так и результатов воздействия оператора на протекающие технологические процессы. В последние годы получают распространение более совершенные графические цветные дисплеи, на экране которых отображаются мнемосхемы оборудования, а также выделяются цветом технологические параметры, значения которых вышли за допустимые пределы.

Микропроцессорным устройством, широко применяемым в технологическом оборудовании для производства изделий микроэлектроники и предназначенным для выполнения различных функций управления, является серийно выпускаемый блок централизованного управления БУ-3 "Орион-3". Этот блок выпускается нескольких модификаций, в основном отличающихся возможностью обработки различного количества дискретных и аналоговых сигналов.

Рассмотрим в качестве примера систему управления установки непрерывного действия УВНМЭ-100/125-003 (см. рис. 58), которая состоит из микропроцессорного блока управления "Орион-3", контроллера "жесткой" логики "Логикон" и релейных блоков управления.

Управляет нагревателем подложек блок "Орион-3", позволяющий запрограммировать и стабилизировать ток нагревателя.

Для защиты элементов конструкции рабочей камеры от перегрева при отсутствии охлаждающей воды на вход блока "Орион-3" поступает сигнал с датчика наличия воды и срабатывает блокировка. Значение тока и возникновение неисправности устройства нагрева отображаются на экране дисплея.

Управляет мощностью магратронов и регулирует ее по показаниям датчиков тока и напряжения блок "Орион-3".

Стабилизация давления аргона, напускаемого в рабочую камеру нанесения пленок, производится блоком "Орион-3".

Ресурс использования мишени магратрона определяется по суммарной энергии, выделяемой на катоде в процессе нанесения пленки и подсчитываемой блоком "Орион-3". Оставшийся ресурс использования мишени магратрона отображается в процентах на экране дисплея.

Контроль за состоянием пневматической системы, обеспечивающей подачу сжатого воздуха на пневмоприводы клапанов вакуумной системы, осуществляется по сигналу датчика давления блоком "Орион-3".

Управляют шлюзами загрузки-выгрузки релейные блоки управления и контроллер "Логикон", а для диагностики работы шлюзов и выдачи команды на загрузку рабочей камеры по показаниями датчиков служит блок "Орион-3". Счет количества загруженных подложек производится блоком "Орион-3" по сигналам, поступающим с датчика нахождения подложек в приемной части конвейера.

Для управления перегрузочными пассиками в шлюзовой камере служит контроллер "Логикон". Если за 100 с подложка не загрузилась на конвейер, блок "Орион-3" формирует и высвечивает на экране дисплея сообщения об аварии. После поступления подложки в выходную кассету срабатывает датчик ее наличия и кассета перемещается на шаг вверх для ожидания прихода очередной подложки. После этого блок "Орион-3" начинает считать время до прихода очередной подложки и сравнивает его с расчетным. Если за это время очередная подложка не появится, блок "Орион-3" воспринимает это как окончание обработки партии подложек.

Приводом конвейера также управляет блок "Орион-3", обеспечивая задание необходимой скорости перемещения и ее стабилизацию. При этом на экране дисплея отображается значение заданной скорости.

Управляют вакуумной системой, обеспечивая необходимые блокировки, контроллер "Логикон" и релейный блок. Результаты контроля давления в разных частях установки отображаются на экране дисплея.

В режиме программирования работы установки оператор с клавиатуры может задать следующие параметры:

Шаг цепи конвейера, мм	75 – 125
Скорость конвейера, мм/мин.	120 – 240
Ток нагревателя, В	2 – 4
Давление аргона в рабочей камере. . . .	$1,3 \cdot 10^{-1}$ – 1,3
Мощность магнетрона, кВт	0 – 6
Ресурс работы мишени, %	100 – 10

Управляющей программой предусматривается проведение диагностики работы агрегатов и устройств установки. При этом на экран дисплея (в его нижней части) могут выводиться, например, следующие диагностические сообщения: "Нет сжатого воздуха", "Затвор закрыт"; "Крионасос откачан", "Кассета загрузки пуста", "Плохой вакуум в камере", "Не открыт шлюз загрузки", "Не открыт шлюз выгрузки", "Высоковакуумная откачка камеры" и др.

К О Н Т Р О Л Ь Н Ы Е В О П Р О С Ы

1. Какие основные типы вакуумных установок нанесения тонких пленок вы знаете?
2. Из каких основных элементов состоят установки вакуумного нанесения пленок?
3. Какие рабочие камеры имеют вакуумные установки периодического действия?
4. Каковы особенности работы вакуумных установок полунепрерывного действия?
5. Каковая последовательность операций при работе вакуумных установок непрерывного действия?
6. Каково назначение микропроцессорных систем управления?
7. Какие виды систем управления вы знаете?
8. Из каких устройств состоит автоматическая система управления установкой УВНМЭ-100/125-003 и какие функции они выполняют?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ЭЛЕКТРОННО-ВАКУУМНАЯ ГИГИЕНА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

§ 31. ЭЛЕКТРОННО-ВАКУУМНАЯ ГИГИЕНА

Чистота исходных материалов и высокая чистота поверхностей подложек значительно влияют на электрические параметры, надежность и долговечность полупроводников приборов и ИМС. Даже самые мельчайшие загрязнения поверхностей подложек органическими и неорганическими веществами (пот, жиры, масла, соли, пары, газы, оксиды и др.) или посторонними микроскопическими частицами пыли, волокон, ворсинок могут вызвать разрывы, поры ("проколы") и токи утечки в тонкопленочных элементах.

Для изготовления качественных и надежных полупроводниковых приборов и ИМС необходимо строго соблюдать производственную гигиену, т. е. выполнять мероприятия, обеспечивающие защиту подложек от загрязнений. На предприятиях контроль возлагается на специальную службу производственной гигиены, работники которой ежедневно проверяют состояние электронно-вакуумной гигиены в цехах и на участках.

Строгое соблюдение требований электронно-вакуумной гигиены на различных стадиях технологического процесса изготовления изделий микроэлектроники является непреложным законом и обеспечивает надежность отдельных приборов и ИМС, а следовательно, и надежность сложнейших устройств (радиоэлектронной аппаратуры, вычислительных машин, автоматических систем управления и др.).

Процессы нанесения пленок обычно проводятся в специальных герметизированных помещениях или чистых комнатах. Межсоединения в виде тонких пленок, получаемые на полупроводниковой подложке после литографии, имеют ширину 3 — 1,5 мкм (а в ближайшее время будут менее 1 мкм), что соизмеримо с размером пылинок, находящихся в воздухе цеха. Попадание пылевидной частицы на полупроводниковую подложку может привести к перекрытию соседних межсоединений и браку.

В зависимости от характера технологических операций производственные помещения по предъявляемым к ним требованиям электронно-вакуумной гигиены подразделяют на несколько категорий. Тонкие пленки наносят только в помещениях первой категории, к которым относят так называемые *герметичные помещения* (полностью изолированные от внешней среды), или *гермозоны*. В этих помещениях особенно тщатель-

но поддерживаются постоянные режимы влажности и температуры, максимальная чистота воздуха и спецодежды обслуживающего персонала. Герметичные помещения в основном предназначены для проведения особо ответственных операций, в частности изготовления тонкопленочных элементов.

Важными условиями чистоты герметичных помещений являются приток в них высококачественного обеспыленного воздуха и контроль среды. Наибольшим препятствием на пути создания стабильных и надежных ИМС является *запыленность*. В воздухе закрытых помещений всегда содержится определенное количество пыли. Пыль представляет собой совокупность весьма мелких твердых частиц, способных благодаря своим малым размерам находиться более или менее длительное время во взвешенном состоянии в воздухе.

В воздухе обычных рабочих помещений преобладают мелкие частицы пыли размером до 10 мкм, причем от 40 до 90 % пылинок имеют размеры менее 2 мкм. Способность взвешенных в воздухе частиц удерживаться в воздухе или выпадать из него зависит от их размеров и плотности. Частицы размером 10–0,1 мкм в спокойном воздухе оседают медленно, а размером менее 0,1 мкм практически совсем не оседают. Частицы пыли размером 2 мкм, которые в спокойном воздухе оседают, в подвижном воздухе почти не оседают.

В помещениях первой категории допускается содержание в 1 л воздуха не более четырех частиц размером не более 0,5 мкм.

В атмосферном воздухе всегда присутствуют водяные пары. Максимальным количеством водяных паров, которое может содержаться в 1 кг воздуха без того, чтобы они начали выпадать в виде тумана или конденсироваться, определяется *максимальная влажность воздуха*. Влажность зависит от температуры воздуха: чем выше температура, тем больше в нем может содержаться водяных паров и тем выше его максимальная влажность.

Микроклимат помещений первой категории характеризуется следующими параметрами: температурой зимой (21 ± 1)° С, летом (23 ± 1)° С и относительной влажностью (45 ± 5) %.

Серьезную опасность представляют загрязнения органического происхождения, которые возникают при хранении деталей на атмосфере даже в течение очень короткого времени. При этом на поверхности деталей образуются с трудом удаляемые органические пленки.

Очищают воздух фильтрацией с последующим кондиционированием до необходимой относительной влажности, температуры.

Запыленность помещений определяется количеством пылинок в 1 л воздуха или количеством пылинок, оседаемых на 1 см² поверхности в 1 ч. Для уменьшения запыленности необходимо, чтобы давление воздуха в помещениях первой категории превышало давление в смежных помещениях более низкой категории на 24,5 — 49 Па.

Кондиционированный воздухообмен должен обеспечивать распределение поступающего очищенного воздуха с равномерной температурой по всей высоте помещения, исключать его конвекцию, сквозняки и направленные потоки, которые могут привести к усиленному перемещению частиц пыли.

Для передачи деталей с одного участка на другой предусматриваются входные тамбуры со шлюзами, отсос запыленного воздуха из которых должен преобладать над притоком чистого воздуха.

Немаловажная роль отводится уборке помещений. Мыть полы следует ежедневно за 30 мин до начала смены и, кроме того, в каждый обеденный перерыв необходимо их протирать. Мытье, влажную протирку стен, колонн, потолков, светильников проводят два раза в месяц.

Изложенные выше требования к производственным помещениям могут быть обеспечены только при условии знания и строгого соблюдения работающими предъявляемых к этим помещениям правил, так как их нарушение приводит к браку изделий.

Лица, работающие в производственных помещениях первой категории, обязаны соблюдать личную гигиену, тщательно следить за чистотой рук, одежды, обуви, оставлять пиджаки, жилеты, личную обувь в бытовых помещениях, работать в соответствующей технологическому режиму одежде.

Перед началом работы в помещениях первой категории необходимо обязательно обеспылить в обдувочном шлюзе рабочую (технологическую) одежду и проверить состояние рабочего места, приспособлений, приборов и инструмента. По окончании работы следует убрать рабочее место, очистить и спрятать приспособления и инструмент.

Лица, работающие в помещениях первой категории, должны также знать и выполнять требования, предъявляемые к технологической одежде, которая необходима для предохранения рабочего места от попадания пыли, ворса, волос и тому подобных загрязнений.

Выбор технологической одежды зависит от категории производственного помещения, профессии и должности работающего. Технологическая одежда (халаты, тапочки, косынки, шапочки, костюмы, комбинезоны) закрепляется за каждым ра-

бочим и должна соответствовать его размеру, росту и индивидуальным особенностям фигуры, не стеснять свободы движений и не затруднять доступ воздуха к кожному покрову. Волосы полностью закрываются шапочкой или косынкой.

Оборудование для исключения мест скопления пыли должно быть обтекаемой формы, без углублений, щелей и карманов. Особые требования предъявляют к чистоте внутренних поверхностей вакуумных систем, технологических камер и др. На внутренних поверхностях рабочих камер могут накапливаться механические загрязнения в виде мельчайших чешуек, отслоившихся от пленок, попавших на стенки камеры. При эксплуатации на внутренних поверхностях оборудования могут также появляться жировые загрязнения в виде молекул масла, мигрирующих из откачных систем.

Существует обширный ассортимент растворителей для удаления жиров и масел с металлических поверхностей. Однако для промывки вакуумной аппаратуры могут использоваться лишь некоторые из них. Выбирают растворитель, учитывая конкретные условия техники безопасности.

Для транспортировки и хранения чистых деталей применяют специальную тару, обеспечивающую их защиту от механических повреждений, попадания пыли и других загрязнений.

Таким образом, основные требования электронно-вакуумной гигиены в производстве полупроводниковых приборов и ИМС сводятся к соблюдению строжайшей чистоты на всех операциях технологического процесса и устранению опасностей, которые могут ее нарушить.

§ 32. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При эксплуатации, ремонте и испытаниях вакуумного технологического оборудования обслуживающий персонал должен быть защищен от таких опасных и вредных производственных воздействий, как поражение электрическим током, движущимися и вращающимися частями оборудования, а также высоко- и низкотемпературных ожогов, аэрозолей, образующихся при чистке внутрикамерных устройств, шумов, вибраций и ВЧ-излучений. Источниками электрической опасности являются электрические сети питания оборудования, высоковольтные источники и пульты, электронагреватели для обезгаживания элементов вакуумных систем.

Перед эксплуатацией необходимо проверить правильность подключения оборудования голый медной или стальной шиной сечением не менее 10 см^2 к цеховому контуру заземления. Болты для подключения защитного заземления находятся на

задних стенках шкафов управления и питания, а также установок.

Осматривать и ремонтировать механизмы можно только после отключения установок от сети питания выключателем "Сеть" шкафа управления. Запрещается при работе установок отключать кабели, соединяющие между собой их отдельные части, а также работать на установках при открытых дверях и щитках. Источниками шума и вибрации являются приводы механических насосов. Вакуумные насосы и агрегаты средней и большой производительности для уменьшения шума и вибраций, передаваемых на рабочие места, должны устанавливаться на фундаменты или виброизолирующие опоры (виброизоляторы), иметь звукоизолирующие кожухи или размещаться на технологическом этаже.

Выпускные патрубки вакуумных насосов и агрегатов должны подсоединяться к централизованному выпускному трубопроводу, на котором устанавливаются сменные фильтры, исключаящие загрязнение воздушной среды помещений. При первом пуске двигателя форвакуумного насоса необходимо предварительно убедиться в правильном направлении вращения электродвигателя.

Источниками высокотемпературных ожогов могут быть поверхности элементов, подвергающихся прогреву. Поэтому кипятильники для рабочей жидкости пароструйных насосов и агрегатов должны быть закрыты теплоизоляционными кожухами, а электронагреватели — надежно изолированы от корпусов и недоступны для случайного прикосновения. Снимать и устанавливать электронагреватель можно только после отключения напряжения сети питания и охлаждения.

Источником низкотемпературных ожогов (обморожения) могут быть системы охлаждения ловушек жидким азотом. При работе со сжатыми и сжиженными газами следует знать и соблюдать требования техники безопасности. Так как при попадании на кожу жидкие газы вызывают ожоги, необходимо предохранять сосуды Дьюара во избежание их выплескивания от резких толчков и ударов. Запрещается хранить сосуды Дьюара с жидкими газами около радиаторов и нагревательных приборов. Система автоматической подачи жидкого азота к охлаждаемому объему должна быть снабжена предохранительным клапаном, срабатывающим при избыточном давлении более $1,17 \times 10^5$ Па.

Высокочастотные генераторы должны быть полностью закрыты металлическими защитными экранами, имеющими хорошие электрические контакты в местах соединений и разъемов отдельных частей, и заземлены. Линии питания высоко-

частотной энергией обязательно выполняют коаксиальным кабелем.

Внутрикамерные поверхности следует очищать от нанесенных пленок, используя местные пылеотсасывающие устройства. Очистку рабочих камер, ремонт и регулировку внутрикамерных устройств можно выполнять только после отключения установок от сети питания и снятия разрядными устройствами остаточных зарядов.

Вакуумные установки для нанесения тонких пленок должны иметь блокировки, обеспечивающие безаварийную и безопасную работу. Запрещается работать на неисправных устройствах, аппаратах, снимать ограждения и нарушать блокировки, выполнять работы, не предусмотренные производственной инструкцией, оставлять работающую установку без наблюдения.

К работе допускаются лица, изучившие инструкцию по технике безопасности для каждой конкретной вакуумной установки и прошедшие местный инструктаж по безопасности труда. Такие установки может обслуживать оператор, имеющий квалификационную группу по технике безопасности не ниже третьей.

Все работающие и вновь поступившие на предприятие рабочие, служащие и инженерно-технические работники независимо от стажа и опыта работы проходят инструктаж и обучение по безопасному ведению работ на основании требований соответствующих правил и инструкций по технике безопасности и производственной санитарии. На предприятиях Министерства электронной промышленности введен трехступенчатый контроль по охране труда.

Первую ступень контроля осуществляют мастер и общественный инспектор по охране труда, которые ежедневно на своем участке перед началом смены проверяют, обеспечены ли условия безопасной работы.

Вторую ступень контроля осуществляет комиссия, в которую входят начальник цеха и общественный инспектор по охране труда цехового комитета профсоюза, механик, энергетик и руководители других служб цеха. Один раз в неделю эта комиссия проверяет обеспечение условий безопасности труда на всех производственных участках цеха и работу мастеров по охране труда.

Третью ступень контроля осуществляет комиссия в составе главного инженера предприятия и председателя комиссии охраны труда профсоюзного комитета с участием работника отдела техники безопасности, главного механика, главного энергетика, главного технолога и руководителей других служб предприятия. Эта комиссия один раз в месяц по установленному

графику проверяет состояние охраны труда, выполнение необходимых мероприятий и на месте решает все вопросы, связанные с обеспечением безопасности труда.

К О Н Т Р О Л Ь Н Ы Е В О П Р О С Ы

1. Каковы задачи электронно-вакуумной гигиены в производстве полупроводниковых приборов и ИМС?

2. Какими параметрами характеризуются помещения, предназначенные для проведения процессов нанесения тонких пленок?

3. Какие требования электронно-вакуумной гигиены предъявляют к обслуживающему персоналу?

4. Каковы основные требования техники безопасности при работе на вакуумных установках?

5. Каков порядок прохождения инструктажа по технике безопасности?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уважаемый читатель!

Изучив эту книгу, вы узнали, каково назначение тонких пленок при изготовлении полупроводниковых приборов и ИМС, какими методами их наносят, используя различное вакуумное технологическое оборудование, и как контролируют параметры технологических процессов и осажденных слоев.

В данном учебном пособии описаны только основные методы и вакуумное оборудование. Освоив этот учебный материал, вы в дальнейшей работе по выбранной специальности сможете, знакомясь с технической литературой и новейшей технологией, легко овладеть другими методами нанесения тонких пленок. Все это будет способствовать повышению вашей квалификации, позволит сознательно выполнять порученную работу и вносить свой вклад в развитие микроэлектроники.

В добрый путь!

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Д а н и л и н Б.С. Получение тонкопленочных элементов микросхем. М., 1977.

К у з н е ц о в В.И., Н е м и л о в Н.Ф., Ш е м я к и н В.Е. Эксплуатация вакуумного оборудования. М., 1978.

П а н ф и л о в Ю.В., Р я б о в В.Т., Ц в е т к о в Ю.Б. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы. М., 1988.

М и н а й ч е в В.Е. Вакуумное оборудование для нанесения пленок. М., 1978.

М о р я к о в О.С. Устройство и наладка оборудования полупроводникового производства. М., 1988.

М о и с е е в О.К., Р о м а н о в А.С. Технология полупроводникового производства. М., 1984.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая. Тонкие пленки в полупроводниковых приборах и микросхемах	5
§ 1. Основные сведения	5
§ 2. Нанесение пленок в вакууме	11
§ 3. Вакуум в тонкопленочной технологии	16
§ 4. Влияние вакуума на процесс нанесения пленок	20
§ 5. Получение конфигураций тонкопленочных элементов	22
Глава вторая. Нанесение пленок методом термического испарения	27
§ 6. Основные сведения	27
§ 7. Испарители с резистивным нагревом	31
§ 8. Испарители с электронно-лучевым нагревом	38
Глава третья. Нанесение пленок методом ионного распыления	42
§ 9. Основные сведения	42
§ 10. Диодные системы ионного распыления	44
§ 11. Магнетронные системы ионного распыления	47
§ 12. Высокочастотный и реактивный методы ионного распыления	51
Глава четвертая. Контроль параметров пленок и технологических режимов их нанесения	54
§ 13. Основные сведения	54
§ 14. Измерение толщины пленок	54
§ 15. Измерение электрического сопротивления пленок	56
§ 16. Измерение адгезии пленок	57
§ 17. Измерение скорости нанесения пленок	58
Глава пятая. Вакуумные системы	60
§ 18. Основные сведения	60
§ 19. Механические форвакуумные и двухроторные насосы	61
§ 20. Диффузионные паромасляные насосы	66
§ 21. Криогенные насосы	68
§ 22. Турбомолекулярные насосы	70
§ 23. Измерение вакуума	71
§ 24. Контроль состава остаточной атмосферы	76
§ 25. Откачные вакуумные системы	77

Г л а в а ш е с т а я. Оборудование для нанесения тонких пленок	81
§ 26. Основные сведения	81
§ 27. Вакуумные установки периодического действия	83
§ 28. Вакуумные установки полунепрерывного действия	88
§ 29. Вакуумные установки непрерывного действия	91
§ 30. Микропроцессорное управление установками нанесения тонких пленок	95
Г л а в а с е д ь м а я. Электронно-вакуумная гигиена и техника безопасности	100
§ 31. Электронно-вакуумная гигиена	100
§ 32. Техника безопасности	103
Заключение	107
Рекомендуемая литература	108

Учебное издание

Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники

Книга 6

Виктор Егорович Минайчев

НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК В ВАКУУМЕ

Зав. редакцией С.В. Никитина. Редактор А.Ш. Долгова. Мл. редакторы Л.А. Васильева, Т.В. Шеганова. Художник П.Б. Борисовский. Художественный редактор В.Г. Пасичник. Технический редактор Л.М. Матюшина. Корректор Г.Н. Буханова. Оператор Н.В. Хазраткулова.

ИБ № 7869

Изд. № Эг-221. Сдано в набор 25.01.89. Подп. в печать 16.05.89. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. кн.-журн. Гарнитура Пресс Роман. Печать высокая. Объем 5,88 усл. печ. л. 6.09 усл.кр.-отт. 6,25 уч.-изд. л. Тираж 30 000 экз. Зак. № 539. Цена 15 коп. Издательство "Высшая школа", 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Набрано на наборно-пишущих машинах издательства

Отпечатано в Ярославском полиграфкомбинате Госкомпечати СССР. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.