МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)

Кафедра технологических систем электроники

НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ВАКУУМНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

Методические указания к лабораторной работе по дисциплинам
«Технология материалов и изделий электронной техники»
и
«Технология создания технических систем»

Москва 2006

Составитель канд.техн.наук. Б.А. Лапшинов

УДК 621.38

Нанесение тонких пленок методом вакуумного термического испарения: Метод. указания к лабораторной работе по дисциплинам «Технология материалов и изделий электронной техники» и «Технология создания технических систем» / Моск. гос. ин-т электроники и математики; Сост. Б.А. Лапшинов. М., 2006. – 30с.

Содержанием работы является закрепление теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях, знакомство с конструкцией и принципами работы на технологической установке нанесения тонких пленок и проведение исследований влияния режимов процесса вакуумного термического испарения на параметры формируемой пленки.

Лабораторная работа выполняется в объеме четырех часов.

Для студентов III курса ФЭ и V курса факультета АВТ.

Табл.1. Ил. 20. Библиогр.: 3 назв.

ISBN 5-94506-133-6

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1. Ознакомление с технологией получения тонких металлических пленок методом вакуумного термического испарения.

2. Исследование влияния режимов процесса вакуумного термического испарения на параметры формируемой пленки.

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.

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.

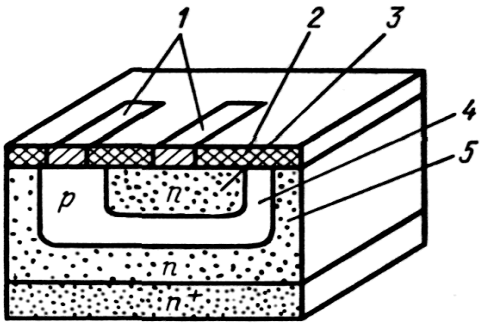


Рис. 1. Структура планарного транзистора: 1 – тонкопленочные контакты; 2 – оксидный слой; 3 – эмиттер; 4- база; 5 - коллектор

Наиболее часто благодаря простоте 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 сложности 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 □ (Ом/квадрат) квадрата тонкопленочного материала толщиной *d*п, к двум противоположным сторонам которого подведены контактные выводы:

$$R_{\square} = \rho / d_{п} ,$$

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).

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.

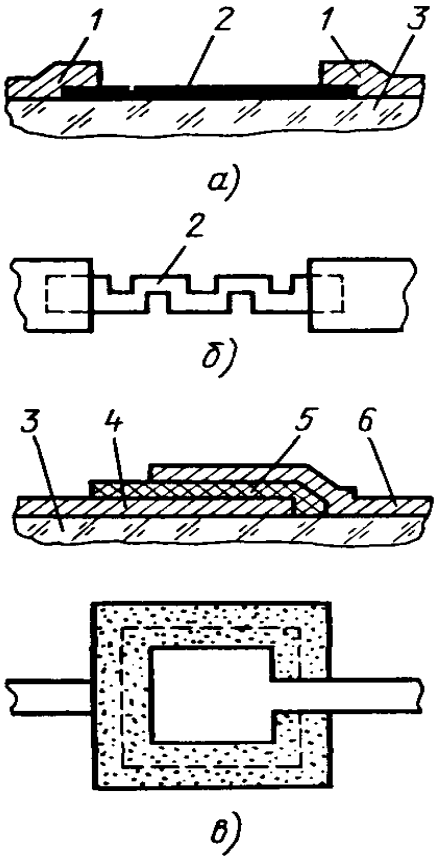


Рис. 2. Структура тонкопленочных резисторов (*а, б*) и конденсатора (*в*): 1 - контактные выводы; 2 – резистивная пленка; 3 – диэлектрическая подложка; 4, 6 – нижний и верхний металлические пленочные электроды; 5 – пленочный диэлектрик

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.

Обычно обкладки конденсаторов выполняют из пленок алюминия. При этом верхние обкладки танталовых конденсаторов изготовляют 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.

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 протекает 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 тонко- или толстопленочные 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.

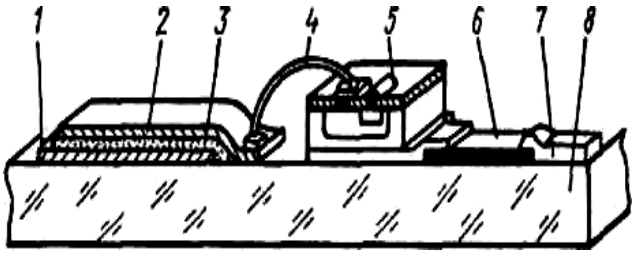


Рис. 3. Структура пленочной гибридной ИМС: 1, 2 - нижний и верхний электроды конденсатора; 3 - слой диэлектрика; 4 - проволочная соединительная шина; 5 - навесной транзистор; 6 - пленочный резистор; 7 - контактный вывод; 8 - диэлектрическая подложка

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).

Структуры элементов полупроводниковой ИМС — транзистора, диода, резистора и конденсатора, изготовляемых соответствующим легированием локальных участков полупроводника методами планарной технологии, показаны на рис. 4, *а* - *г*. Планарная технология характеризуется тем, что все выводы элементов ИМС располагаются в одной плоскости на поверхности 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.

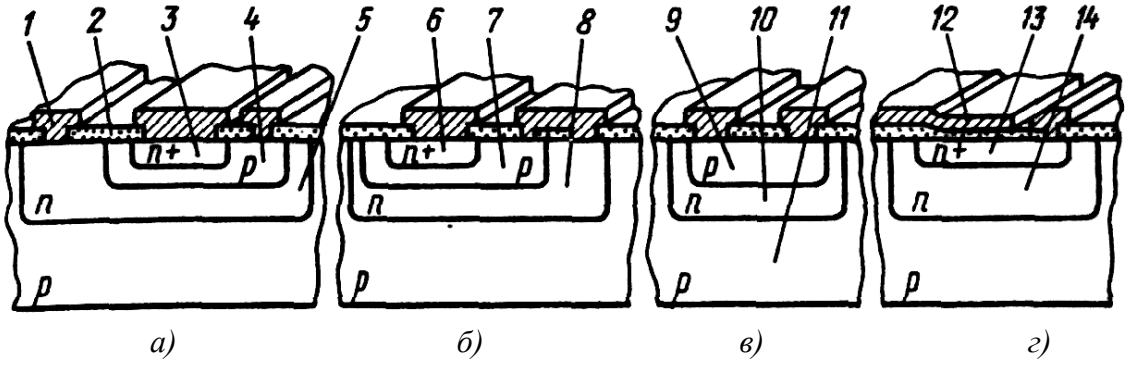


Рис. 4. Структуры элементов полупроводниковой ИМС: *а* - транзистора, *б* - диода, *в* - резистора, *г* - конденсатора; 1 - тонкопленочный контакт; 2 - слой диэлектрика; 3 - эмиттер; 4 – база; 5 – коллектор; 6 – катод; 7 – анод; 8 - изолирующий слой; 9 - резистивный слой; 10 - изолирующий слой; 11 –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

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.

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. 5) 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.

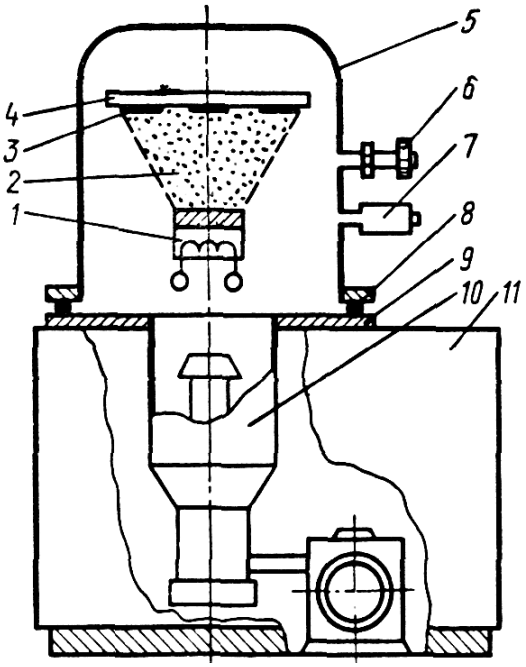


Рис. 5. Схема установки для нанесения пленок: 1 - источник потока наносимых частиц; 2 - поток частиц; 3 - подложка; 4 - подложкодержатель; 5 - рабочая вакуумная камера; 6 - кран напуска воздуха; 7 - датчик изменения вакуума; 8 - кольцевая резиновая прокладка; 9 - базовая плита; 10 - вакуумная откачная система; 11 - каркас

Кран 6 служит для напуска в камеру воздуха, а датчик 7 - для измерения вакуума в ее рабочем пространстве. Над источником 1, генерирующим 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 поддожкодержателе при поднятом колпаке;
- закрытия (герметизации) рабочей камеры и откачки ее до требуемого вакуума;
- включения источника, создающего атомарный (молекулярный) поток осаждаемого вещества;
- нанесения пленки определенной толщины при постоянно работающих источнике потока частиц и вакуумной системе;
- выключения источника потока частиц, охлаждения подложек и напуска воздуха в рабочую камеру до атмосферного давления;
- подъема колпака и съема 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. 6).

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

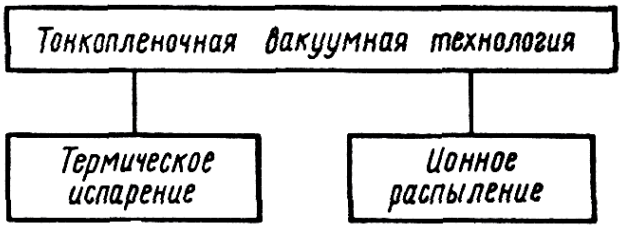


Рис. 6. Способы нанесения пленок в вакууме

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.

Выбор того или иного метода нанесения пленки зависит от многих факторов, основными из которых являются природа 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.7).

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

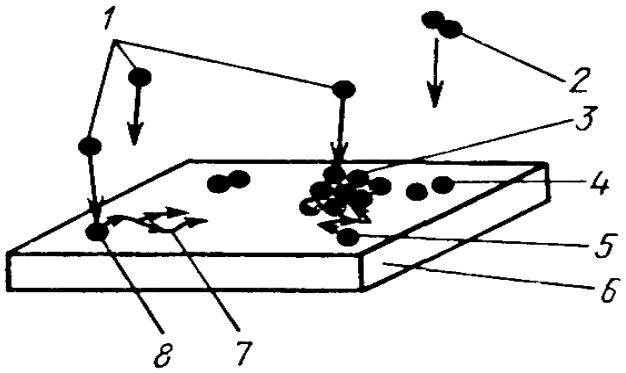


Рис. 7. Взаимодействие осаждаемых частиц с подложкой: 1 - частицы в вакуумном пространстве; 2 - дуплет частиц в вакуумном пространстве; 3 - центр кристаллизации; 4 - адсорбированный дуплет частиц; 5 - рост кристаллита за счет мигрирующих частиц; 6 - подложка; 7 - поверхностная миграция частиц; 8 - адсорбированная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

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 обусловливают необходимость стабильного поддержания температуры подложек и скорости испарения материала.

3. ВАКУУМ В ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

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 м^2 (Н/м^2). 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 1Па = $7{,}5\cdot10^{-3}$ мм рт. ст.

Согласно молекулярно-кинетической теории все молекулы (атомы) газов находятся в постоянном беспорядочном тепловом движении. Хаотичное движение молекул объясняется их взаимными столкно-

вениями. В результате этого путь молекул в пространстве при их тепловом движении представляет собой ломаную кривую, состоящую из отдельных прямолинейных участков. Эти участки соответствуют перемещению молекулы без соударений с другими молекулами. Каждый излом пути 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 слагается зигзагообразный путь молекул газа, называется средней длиной свободного пути молекул, обозначается λ и является одним из важнейших понятий вакуумной техники.

По мере удаления воздуха из объема, т. е. уменьшения давления, λ увеличивается. Причем может наступить такой момент, когда взаимные столкновения молекул практически прекратятся и будут происходить лишь их столкновения со стенками сосуда (камеры), как это показано на рис. 8.

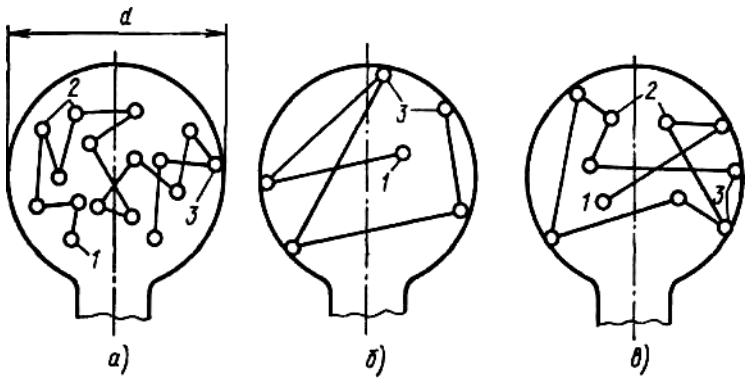


Рис. 8. Путь молекул газа в замкнутом сосуде в условиях низкого $\lambda << d$ (*а*), высокого $\lambda >> d$ (*б*) и среднего $\lambda \approx d$ (*в*) вакуума: 1 - исходное положение молекулы; 2 - места столкновений молекул с другими молекулами; 3 - места удара молекул о стенку сосуда

Для анализа процессов, происходящих при нанесении тонких пленок, большое значение имеет соотношение $\lambda в$ / $d_{ип}$. При этом под $\lambda в$ 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 опытом (рис. 9, *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. 9, *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.

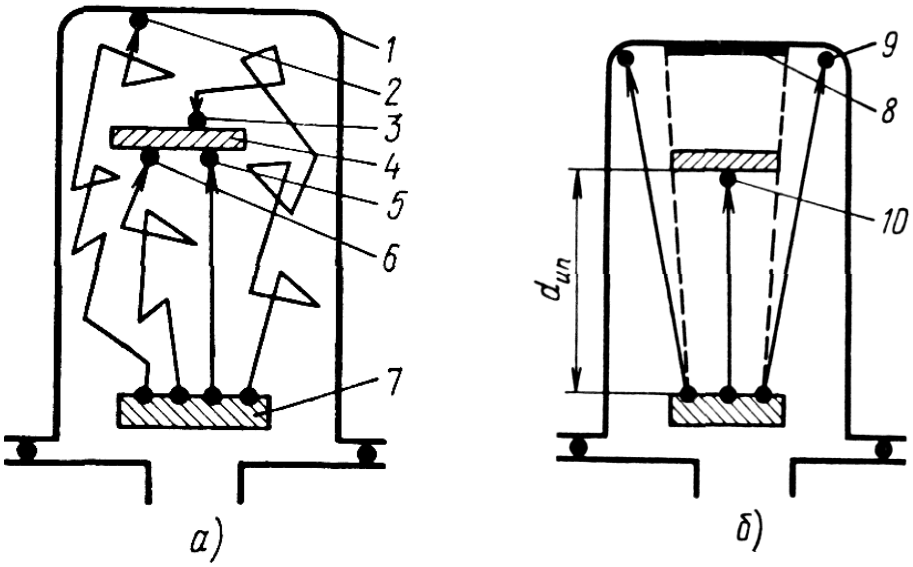


Рис. 9. Движение частиц наносимого вещества в условиях среднего (*а*) и высокого (*б*) вакуума: 1- стеклянная камера; 2, 9 - частицы, осажденные на стенку камеры; 3 - частица, осажденная на обратную сторону подложки; 4 – подложка; 5,10 - частицы, осажденные на лицевую сторону подложки без столкновений;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

При нанесении пленок в высоком вакууме (рис. 9, *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.

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.).

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 осаждаемого вещества и молекула газа, хемосорбированная пленкой, показаны на рис. 10, а - в.

а) *б)* *в)*

Рис. 10. Взаимодействия молекул газа с атомами осаждаемого вещества:

а - молекула газа, адсорбированная на подложке; *б* - молекула газа, замурованная атомами осажденного вещества; *в* - молекула газа, хемосорбированная пленкой осаждаемого вещества

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.

4. НАНЕСЕНИЕ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ

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, происходит, 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. 1. 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 см свободной поверхности в 1 с при условной температуре ***Ту***, рассчитывают по формуле

$$v_{и} = 6 \cdot 10^{-4}\sqrt{M/T_{у}},$$

где M — молекулярная масса, г/моль.

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

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

Таблица 1. Температуры плавления и испарения элементов

Элемент	Атомная масса	$t_{пл}$, °С	$T_{у}$, °С	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_2O_3
Ge	72,6	959	1251	W, Mo, Ta	W, C, Al_2O_3
Mg*	24,3	651	443	W, Mo, Ta, Ni	FeC
Mn	54,9	1244	980	W, Mo, Ta	Al_2O_3
Mo**	95,9	2622	2533	–	–
Ni	58,7	1455	1510	W	Al_2O_3, ZrO_2

* Испаряется из твердого состояния (сублимируется).

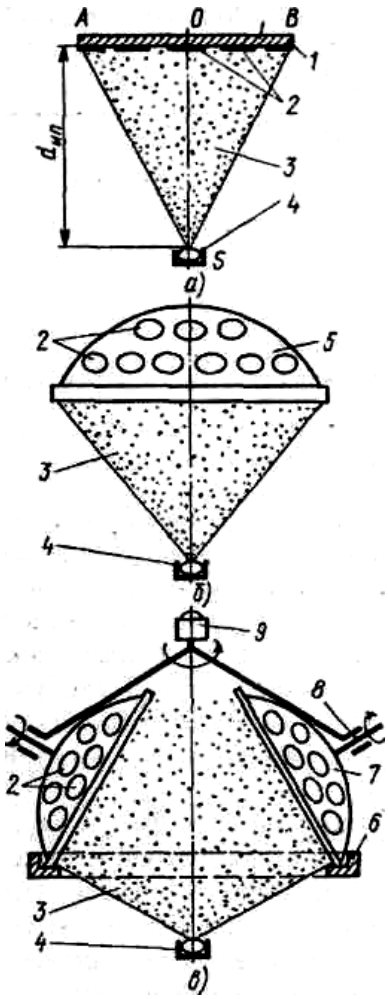
** Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой.

Скорость испарения большинства элементов при ***Ту*** составляет 10^{-4} г/(см^2 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.

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 во много раз меньше площади подложкодержателей (поэтому их называют точечными источниками). В результате добиться равномерности потока невозможно. Как видно из рис. 11, *а*, скорость нанесения пленки будет неодинакова в точке 0 и в точках А и В: чем дальше от оси *0S* эти точки, тем ниже скорость нанесения пленки и тем меньше ее толщина за данное время нанесения. При плоском подложкодержателе неравномерность толщины пленки составляет ± 20 %.



Наиболее простым способом снижения неравномерности распределения пленки по толщине является увеличение расстояния *dun*- Однако это уменьшает скорость конденсации пленки, что отрицательно сказывается на ее

свойствах. Максимально возможное расстояние *dun* ограничено размерами рабочей камеры установки.

Рис. 11. 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

На практике применяют более сложные способы, одним из которых является придание подложкодержателю сферической формы (рис. 11,*б*).

Неравномерность толщины пленки снижается при этом до ± 10 %. Если этого недостаточно, используют систему с двойным вращением, так называемую планетарную карусель (рис. 11, *в*), состоящую из приводной вращающейся оси 9, на которой установлены три подложкодержателя 7. Каждый подложкодержатель может вращаться вокруг собственной оси 8 при обкатывании по кольцу 6 . Так осуществляется планетарное движение подложек. Планетарные карусели стоят довольно дорого, однако при их использовании неравномерность пленок по толщине составляет ± (3 - 4) %.

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.

Испарители с резистивным нагревом

Нагрев электропроводящего тела, обладающего высоким электрическим сопротивлением при прохождении через него электрического тока, называют *резистивным*.

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.

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 легко испаряемые 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 изготовляют испарители. Это значительно снижает их срок службы. Поэтому такие испарители являются одноразовыми и после каждого процесса испарения их заменяют.

Испарители с косвенным нагревом, в которых испаряемое вещество нагревается за счет теплопередачи от нагревателя, 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 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 спирале- и волнообразной.

Проволочный испаритель простейшей конструкции (рис. 12, *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, которую 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. 12, *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 *ф* 0,5 -1 мм из вольфрама 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.

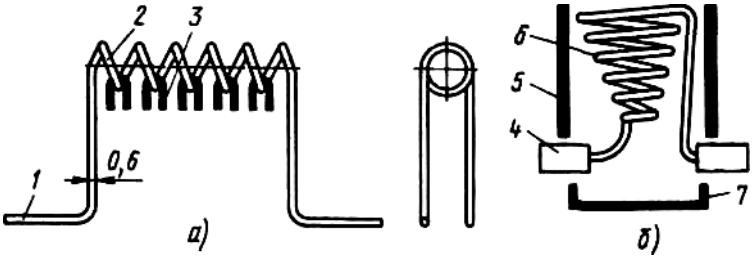


Рис. 12. Проволочные испарители косвенного нагрева с цилиндрической (*а*) и конической (*б*) проволочной спиралью: 1 - отогнутый конец спирали; 2, 6 - цилиндрическая и коническая спиралли; 3 - испаряемый материал (гусарик); 4 - зажимы токоподвода; 5, 7 - цилиндрический тепловой и ограничивающий экраны

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 распространенным материалом 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. 13, *а*. Для снижения теплового потока из зоны испарения к зажимам токоподводов по краям полусферы имеются утонения сечения (шейки).

Испарители лодочного типа (рис. 13, *б*) предназначены для испарения относительно больших количеств вещества. Чтобы скомпенсировать деформации испарителя, его профиль усложнен отгибом лапок, которыми он крепится к зажимам токоподвода.

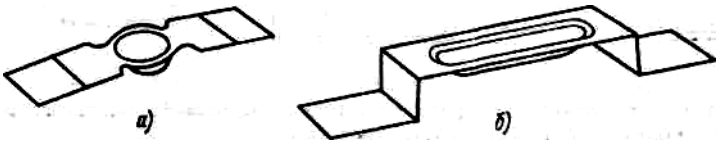


Рис. 13. Ленточные испарители косвенного нагрева из вольфрама, молибдена и тантала толщиной 0,1 - 0,5 мм:
а - с углублением в виде полусферы; *б* - лодочного типа

Если для металлов благодаря их высокой теплопроводности испарение в вакууме есть явление поверхностное, то для таких неметаллических веществ плохой теплопроводности, как диэлектрики (например, SiO2), существует большая вероятность из разбрызгивания при форсированном испарении. В этих случаях применяют испарители коробчатого типа усложненной конструкции (рис. 14), 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, исключающую 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.

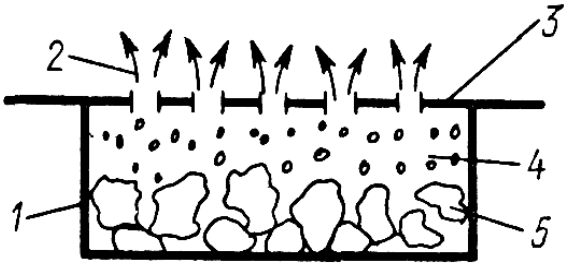


Рис. 14. Испаритель косвенного нагрева коробчатого типа: 1 – коробочка; 2 - поток паров наносимого вещества; 3 –экран; 4 - пары испаряемого вещества; 5 - испаряемое вещество

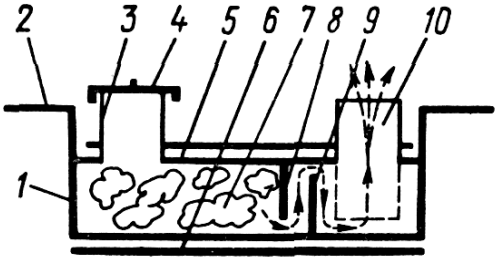


Рис. 15. Испаритель косвенного нагрева лабиринтного типа: 1 – коробочка; 2 – лапки; 3,4 - патрубок для загрузки материала и его крышка; 5 - крышка испарителя; 6 - нижний экран; 7 -испаряемое вещество; 8, 9 - разделительные экраны; 10 - выходной патрубок

Лабиринтный испаритель для оксида кремния (рис. 15) выполнен в

виде коробочки 1, по краям которой имеются лапки 2 для подсоединения к зажимам токоподвода. Сверху 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.

Тигельные испарители используют, как правило, для испарения больших количеств сыпучих диэлектрических материалов. Тигли изготовляют из тугоплавких металлов, кварца, графита, а также керамических материалов (нитрида бора BN, оксида алюминия $A1_2O_3$ - алунда). Максимально допустимая температура кварца составляет 1400° С, графита - 3000° С, оксида алюминия - 1600° С.

Два типа испарителей с тиглями из керамики показаны на рис. 16.

В испарителе первого типа (рис. 16, *а*) нагреватель в виде плоской улитообразной 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 инерционны, так как малая теплопроводность материала, из которого изготовляют тигель, не обеспечивает быстрого нагрева испаряемого вещества.

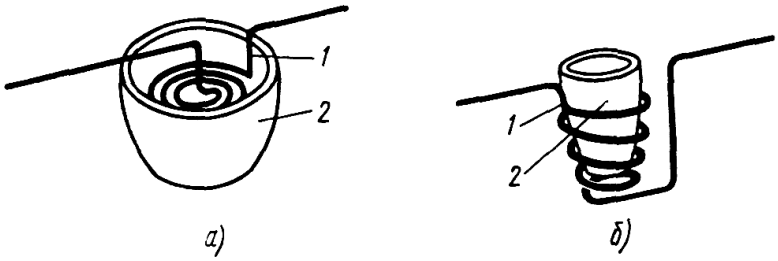


Рис. 16. Испарители прямого нагрева с тиглями с внутренним (*а*) и внешним (*б*) спиральными нагревателями: 1 – спираль; 2 - тигель

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. 17, *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.

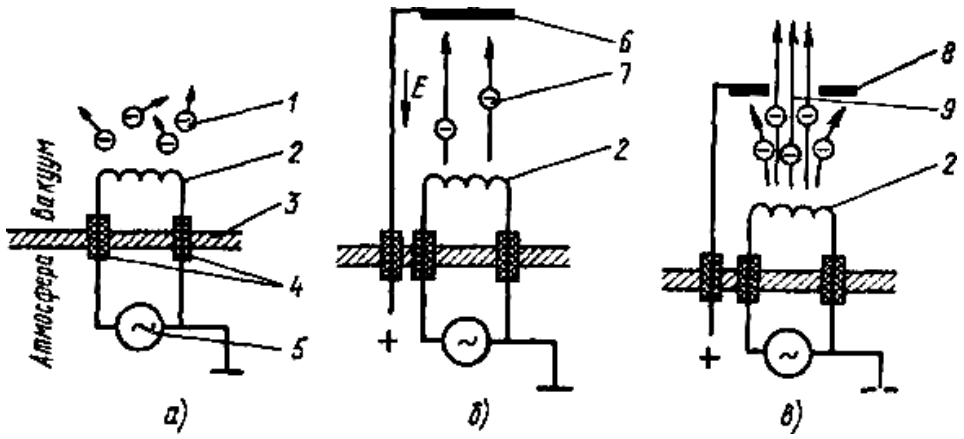


Рис. 17. Эффект термоэмисси (*а*), ускорение электронов (*б*) и формирование электронного луча (*в*): 1 - эмитированные электроны; 2 - термокатод; 3 - стенка вакуумной камеры; 4 — изоляторы; 5 - источник питания термокатода; 7 - ускоренный электрон; 6,8- аноды; 9 - электронный луч

Спиральный термокатод 2 закрепляют на стенках 3 вакуумной камеры через изоляторы 4. При подаче тока накала от источника 5 происходит нагрев термокатода 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

$$v_e = 593\sqrt{U}.$$

При этом кинетическая энергия (эВ) электрона

$$w_к = m_e v_e^2/2,$$

где m_e — масса электрона.

В устройстве для ускорения электронов (рис. 17, *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, эмитируемые катодом 2, притягиваются анодом 6 и образуют направленный поток ускоренных электронов 7.

Для формирования электронного луча 9 (рис. 17, *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. 18).

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

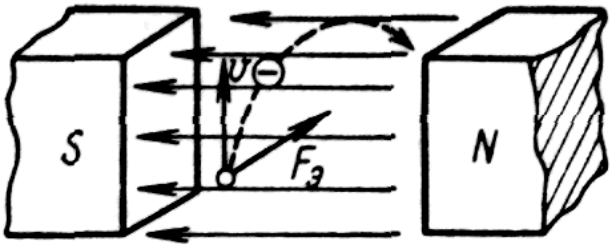


Рис. 18. Движение электронов в магнитном поле

Таким образом, сила Fэ, действующая на электрон, перпендикулярна направлениям скорости его движения и силовых линий магнитного поля. Поскольку сила Fэ 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. 18 штриховой линией). Следовательно, если перпендикулярно электронному лучу приложить магнитное поле, он отклонится.

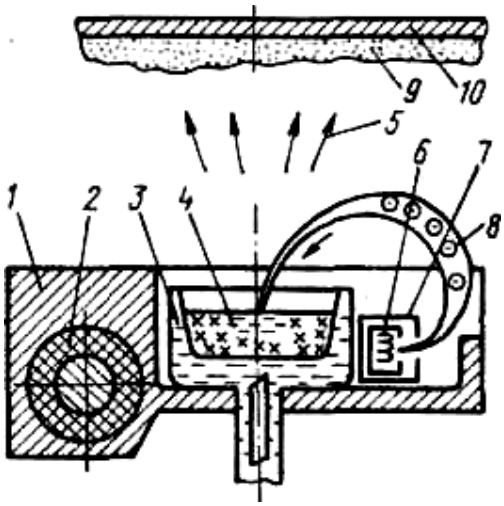


Рис. 19. Электронно-лучевой испаритель:

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

Фокусировка электронного луча позволяет получать большую концентрацию мощности на сравнительно малой поверхности ($5 \cdot 10^8$ Вт/см^2), а следовательно, испарять любые, даже самые тугоплавкие материалы с достаточно большой скоростью.

Электронно-лучевой испаритель (рис. 19) 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 см^3 и более обеспечивают длительную непрерывную работу без добавки испаряемого материала, который, кроме того, не контактирует в расплавленном виде с медными стенками тигля, 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.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПЛЕНОК

В зависимости от назначения пленок обычно определяют метод их контроля и контролируют один или два параметра. Наиболее распространенными методами измерения толщины пленки являются такие, как микровзвешивание и многолучевая интерферометрия.

Метод микровзвешивания состоит в определении приращения массы Δm подложки после нанесения на нее пленки. При этом среднюю толщину пленки определяют по формуле

$$d = \Delta m / (Fn \cdot \rho м,)$$

где Fn - площадь пленки на подложке; $\rho м$ - 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 нанесенного материала, которая может изменяться в зависимости от условий технологических режимов

(остаточного давления, загрязнений молекулами газа и др.).

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

Чувствительность метода взвешивания составляет 1-10 мкг/м и зависит от чувствительности весов и площади пленки на подложке Fп .

6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В лабораторной работе используется напылительная установка УВН-1. Системы питания, измерения и управления смонтированы в отдельный блок. Рабочая камера, вакуумная система и блок управления установлены на передвижном столе.

Вакуумная система установки (рис. 20) состоит из высоковакуумного паромасляного насоса ВВН-50 с воздушным охлаждением, низковакуумного механического пластинчато-роторного насоса 2НВР-5ДМ и системы электромагнитных вентилей. Откачная система обеспечивает рабочее давление $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Система электромагнитных вентилей и затвор переключаются рукояткой управления. Напуск воздуха в рабочую камеру осуществляемся электромагнитным натекателем.

Вакуум в рабочей камере установки измеряется датчиком инверсно-магнитного типа. Датчик позволяет измерить вакуум в диапазоне от 10 Па до $2 \cdot 10^{-4}$ Па. Переключение манометра на измерение высокого или низкого вакуума осуществляется клавишным переключателем, расположенным на передней панели пульта управления.

Установка имеет рабочую камеру из тугоплавкого стекла, положение которой выбирается по желанию вертикальным, горизонтальным или наклонным. С помощью байонетных зажимов через резиновые уплотнения к рабочей камере крепятся сменные фланцы, на которых расположены резистивные испарители, столик с подложкой с механизмом поворота и устройство ионного распыления.

Питание испарителей осуществляется от сильноточного трансформатора, смонтированного в пульте управления. Управление током накала производится регулировочным автотрансформатором, расположенным на передней панели пульта управления.

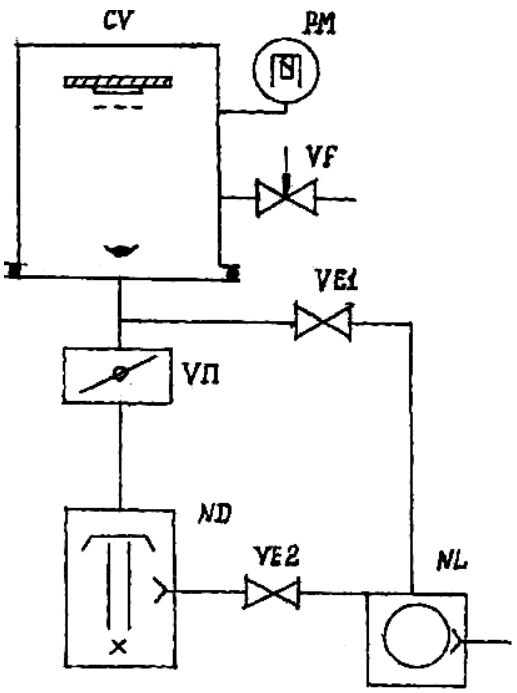


Рис.20. Схема вакуумной системы установки нанесения пленок методом термического испарения

7. ПОРЯДОК РАБОТЫ НА УСТАНОВКЕ

Перед началом работы проделать следующие операции:
а) регулятор автотрансформатора установить в положение 0;
б) кнопка тлеющего разряда выключена;
в) кнопка измерения высокого вакуума выключена;
г) кнопка измерения низкого вакуума выключена;
д) насос форвакуумный выключен;
е) насос высоковакуумный выключен,
ж) питание розетки выключено;
з) рукоятка управления в положении 0.

1. Порядок включения установки:
а) сетевой кабель управления включить в сеть;
б) включить форвакуумный насос;
в) нажать кнопку реле (загорается лампочка на пульте управления);
г) перевести рукоятку в положение I (начинается предварительная откачка рабочей камеры);
д) нажать кнопку измерения форвакуума. В начале откачки стрелка прибора для измерения вакуума находится на делении 0, а затем, достигнув деления 5 мА (что соответствует давлению 10^2 Па), медленно падает до 0 мА (что соответствует приблизительно 10 Па);

е) перевести рукоятку управления в положение 2 и откачать диффузионный насос до форвакуума (1-2 мин);.

ж) включить диффузионный насос (время разогрева 25 мин);

з) через 25 мин. перевести рукоятку управления в положение 3 и тем самым начать откачку рабочей камеры диффузионным насосом;

и) нажать кнопку измерения высокого вакуума;

к) откачать рабочую камеру до давления не более $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

2. Руководство по напылению:

а) подсоединить кабели нагревателя к токовводам на фланце рабочей камеры и соответствующим зажимам на задней панели пульта управления (один - к зажиму 0, второй - к зажиму 4, 8 или 16 А);

б) переключатель "напыление - тлеющий разряд" перевести в положение "напыление";

в) медленно ввести регулировочный автотрансформатор (давление в рабочей камере увеличивается, т.к. происходит газоотделение из испаряемого материала);

г) после окончания обезгаживания (давление падает до первоначального значения) начать процесс напыления;

д) скорость напыления регулировать автотрансформатором;

е) ток контролировать по амперметру на передней панели пульта управления;

ж) контроль формирования наносимого покрытия осуществлять визуально;

з) при достижении необходимого слоя вывести автотрансформатор на 0.

3. Напуск атмосферы в рабочую камеру:

а) выключить датчик высокого вакуума;

б) перевести рукоятку управления из положения 3 в положение 0;

в) нажать кнопку натекателя;

г) после натекания воздуха перевести рукоятку управления в положение 2.

4. Последовательность выключения установки:

а) рабочую камеру закрыть;

б) рукоятку управления поставить в положение 1 и откачать систему до давления 10 Па;

в) рукоятку управления поставить в положение 2;

г) выключить высоковакуумный насос;

д) через 30 мин. перевести рукоятку управления в положение 0;

е) нажать клавишу "Выкл.";
ж) выключить форвакуумный насос.

8. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с методом нанесения металлических пленок термическим испарением в вакууме.
2. Изучить работу напылительной установки.
3. Рассчитать толщину пленки при заданной навеске и расстоянии до подложки.
4. Взвесить подложку и установить ее и шаблон в рабочую камеру.
5. Включить установку согласно описанию.
6. Произвести распыление навески до полного испарения,
7. Извлечь подложку с нанесенным покрытием из рабочей камеры.
8. взвесить подложку с нанесенным покрытием и определить толщину покрытия.

9. ФОРМА ОТЧЕТА

1. Схема вакуумной системы установки.
2. Эскиз одного из испарителей.
3. Расчет толщины пленки.
4. Анализ значений толщины покрытия, полученных в результате расчета и экспериментально.

Рекомендуемая литература:

1. Конспект лекций по дисциплине «Технология материалов и изделий ЭТ»;
2. Парфенов О.Д. Технология микросхем: Уч.пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1986.
3. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник.-М.: Радио и связь, 1991.

Учебное издание

Нанесение тонких пленок методом вакуумного
термического испарения

Составитель
ЛАПШИНОВ Борис Алексеевич

Редактор Е.С. Резникова
Технический редактор О.Г. Завьялова

http://www.miem.edu.ru/rio/

rio@miem.edu.ru

Подписано в печать 18.10.2006. Формат 60x84/16
Бумага офсетная №2. Ризография. Усл.печ.л. 1,9. Уч.-изд. л. 1,7
Изд. № 94. Тираж 25 экз. Заказ . Бесплатно
Московский государственный институт электроники и математики
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3/12.
Отдел оперативной полиграфии Московского государственного
института электроники и математики.
113054, Москва, ул. М. Пионерская, 12.