

1.4. ТОНКОПЛЕНОЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Цель лекции: ознакомление с основами тонкопленочной технологии.

1.4.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Тонкопленочная технология – это совокупность способов получения и обработки тонких плёнок металлов и диэлектриков при изготовлении транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов и других пассивных элементов пленочных, гибридных и совмещенных интегральных схем, а также при изготовлении ПП приборов, коммутационных соединений и монтажных площадок в микросхемах. Толщина получаемых пленок обычно составляет 0,01...2 мкм. Тонкопленочная технология позволяет создать пассивные элементы микросхемы с параметрами более стабильными, чем при толстопленочной технологии.

Существует 2 основных способа получения тонких пленок: термическое испарение и ионное распыление (рис. 1.4.1).



Рис. 1.4.1. Классификация способов получения тонких пленок

1.4.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ВАКУУМНОЕ НАПЫЛЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК

Термическое испарение основано на нагреве напыляемого материала до температуры испарения, после чего тот конденсируется на поверхности подложки. Схема типовой установки для термического вакуумного напыления показана на рисунке 1.4.2.

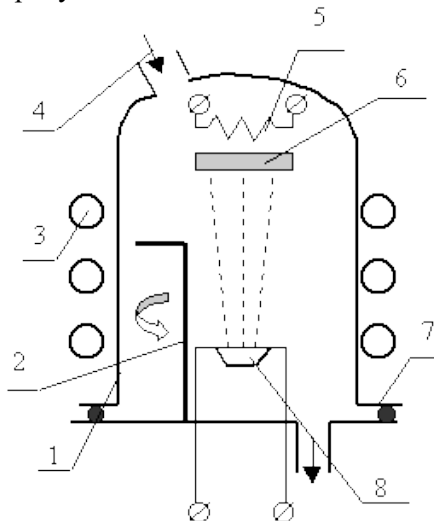


Рис. 1.4.2. Установка для термического вакуумного напыления

1 – вакуумный колпак из нержавеющей стали; 2 – заслонка; 3 – трубопровод для водяного нагрева или охлаждения колпака; 4 – игольчатый натекатель для подачи атмосферного воздуха в камеру; 5 – нагреватель подложки; 6 – подложкодержатель с подложкой, на которой может быть размещен трафарет; 7 – герметизирующая прокладка из вакуумной резины; 8 – испаритель с размещённым в нём веществом и нагревателем (резистивным или электронно-лучевым).

Процесс термовакuumного напыления состоит из четырех этапов:

- образование пара вещества;
- перемещение частиц пара от источника к подложкам;
- конденсация пара на подложках;
- образование зародышей и рост пленки.

Процесс напыления проводится в глубоком вакууме и включает в себя следующие операции: подложки устанавливаются на подложкодержатель (поз. 6), после чего опускается колпак и включается система вакуумных насосов (сначала – низковакуумный, затем – высоковакуумный). Чтобы ускорить десорбцию воздуха с внутренних поверхностей колпака и сократить время откачки воздуха, в трубопровод (поз. 3) подается горячая проточная вода. Давление контролируется по манометру. При достижении заданных значений давления включается нагреватель испарителя (поз. 8) и

подложек (поз. 5). Их температура контролируется с помощью термодатчиков. Заслонка (поз. 2) при этом находится в закрытом состоянии; при достижении заданной температуры заслонка отводится, после чего пары испаренного вещества достигают поверхности подложек и начинается процесс роста пленок. Контроль толщины пленок проводится с использованием автоматизированной системы. Для резистивных пленок фиксируется поверхностное сопротивление, для диэлектрических материалов – толщина пленки, для проводников, контактов и защитных покрытий – время напыления. После достижения заданного значения подается сигнал на соленоиды заслонки, которая перемещается в закрытое положение, после чего напыляемый материал перестает поступать на подложки. Далее отключаются нагреватели, выключается система откачки, а в трубопровод начинает поступать холодная проточная вода. После остывания подколпачных устройств через натекаль (поз. 4) плавно впускают атмосферный воздух. Когда давление внутри колпака достигает атмосферного, можно поднять колпак и начать следующий цикл обработки.

Для обеспечения процесса напыления в объеме рабочей камеры необходимо низкое давление воздуха. Оно обеспечивает прямолинейное движение атомов осаждаемого вещества без столкновения с атомами остаточного воздуха, которое приводит к рассеянию материала в объеме камеры (рис. 1.4.3 а), в результате чего частицы могут осаждаться на стенки камеры и даже с обратной стороны подложки, а также увеличивается время напыления. Кроме того, молекулы газа могут быть адсорбированы подложкой или пленкой, что приведет к дефектам полученной пленки (рис. 1.4.4). При достижении высокого вакуума рассеяние частиц практически отсутствует (рис. 1.4.3 б). Кроме того, таким образом исключается химическое взаимодействие напыляемого вещества с молекулами кислорода.

Обычно для установок термического вакуумного напыления давление составляет порядка 10^{-4} Па. Для достижения требуемого давления используется система из двух насосов. На первой стадии включается форвакуумный насос, который позволяет достичь среднего вакуума, на второй – диффузионный насос.

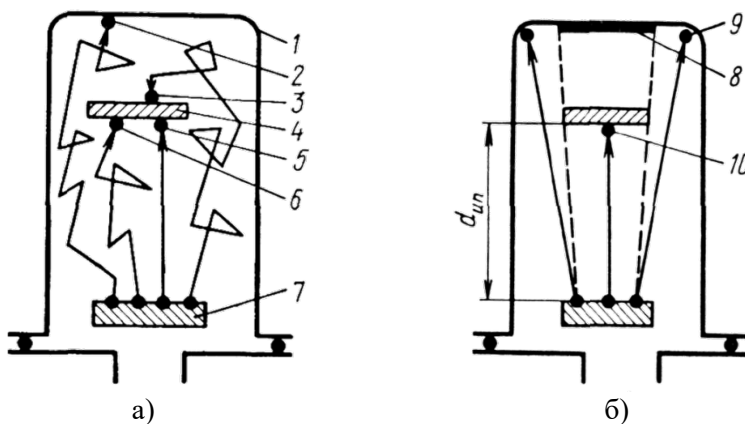


Рис. 1.4.3. Движение частиц наносимого вещества при: а – среднем вакууме; б – высоком вакууме

1 – 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 столкновений; 7 – источник потока частиц; 8 – тень от подложки.

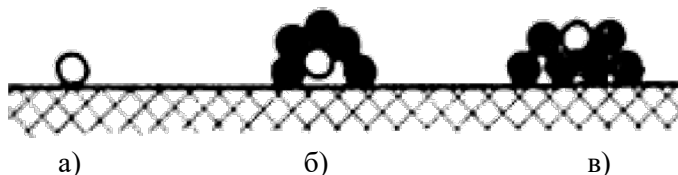


Рис. 1.4.4. Взаимодействие молекул газа с атомами осаждаемого вещества:

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

Подложка имеет температуру, ниже температуры источника пара, в результате чего направленный поток вещества конденсируется на ней. Пленка при конденсации формируется из отдельных атомов или молекул пара вещества. Процесс роста пленки на подложке показан на рис. 1.4.5. Частица, достигшая поверхности, сохраняет энергию и начинает двигаться в поисках прочной связи. Сталкиваясь между собой, частицы слипаются и образуют центры кристаллизации, вокруг которых продолжается рост пленки. Чтобы интенсифицировать этот процесс, подложка нагревается. Постепенно на подложке образуется сплошная пленка, на поверхности которой начинается рост следующего слоя.

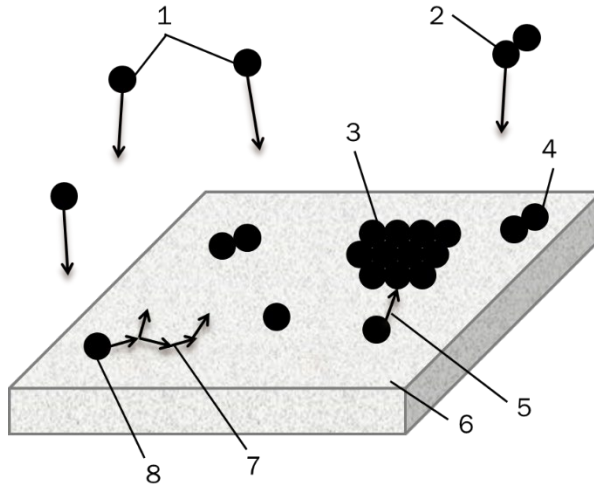


Рис. 1.4.5. Формирование пленок на подложке

1 – частицы в пространстве; 2 – дуплет частиц в пространстве; 3 – центр кристаллизации; 4 – адсорбированный дуплет частиц; 5 – рост кристаллита за счет мигрирующих частиц; 6 – подложка; 7 – поверхностная миграция частиц; 8 – адсорбированная частица

Интенсивность испарения осаждаемого вещества удобно характеризовать упругостью пара P_s – давлением пара в состоянии насыщения, которое определяется по следующей формуле:

$$\lg(P_s) = A - \frac{B}{T},$$

где A , B – коэффициенты (см. табл. 1.3); T – абсолютная температура вещества, К.

Скорость испарения вещества $V_{и}$ определяется по формуле:

$$V_{и} = 6 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{M}{T_y}},$$

где M – молярная масса испаряемого вещества, г/моль; T_y – условная температура вещества, °С.

Оптимальной будет интенсивность испарения, при которой упругость пара составляет порядка 1,3 Па. Соответствующая этой упругости температура испарения называется условной. Для большинства элементов при температуре, равной T_y , скорость испарения составляет 10^{-4} г/см² с.

Таблица 1.4.1.

Температуры плавления и испарения элементов для пленок.

Элемент	$t_{пл},$ °C	$t_{исп},$ °C	Коэффициенты		Рекомендуемые материалы испарителя	
			А	В	Проволоки, ленты	Тигля
Ag	961	1047	(11,4)	(14850)	Mo, Ta	Mo, C
			10,78	14090		
Al	660	1150	11,11	15630	W	C, BN, TiB ₂ —BN
Au	1063	1465	10,77	19250	W, Mo	Mo, C
Cr	1800	1205	(12)	(17560)	W, Ta	—
Cu	1083	1273	10,84	16580	W, Mo, Ta	Mo, C, Al ₂ O ₃
Mo*	2622	2533	(10,92)	(30310)	—	—
Ni	1455	1510	(12,40)	(21840)	W	Окислы
			11,67	20600		
Pd	1555	1566	10,58	19230	W	Al ₂ O ₃
Pt	1774	2090	11,75	27500	W	TiO ₂ , ZrO ₂
Ta*	2996	3070	12,12	40210	—	—
Ti	1725	1546	(10,37)	(18640)	W, Ta	C, TiO ₂
			11,1	20110		
W*	3382	3309	(11,36)	(40260)		

Значения в скобках приведены для твердого состояния.

* Рекомендуется испарение электронно-лучевым нагревом или распыление ионной бомбардировкой

Одной из проблем, которая возникает при термическом вакуумном напылении, является высокая неравномерность толщины получаемой пленки, которая может достигать до 20%. Связана она с особенностями осаждения частиц из точечного источника на плоский подложкодержатель. Из-за того, что расстояние до края подложки больше, чем до центра, толщина пленки на краях меньше, чем в центре (рис. 1.4.6).

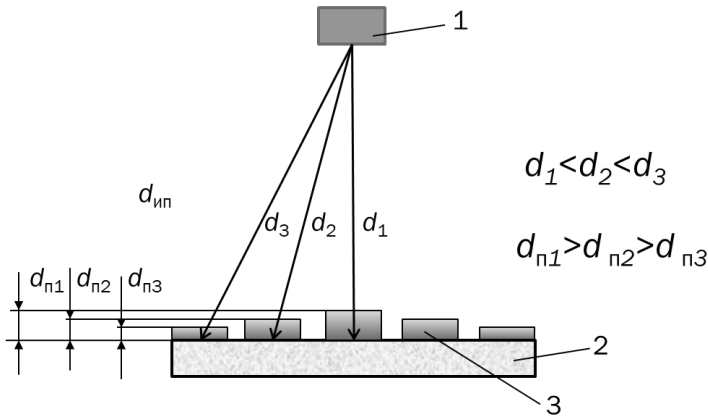


Рис. 1.4.6. Особенности осаждения частиц из точечного источника на плоский подложкодержатель

1 – точечный источник; 2 – подложкодержатель; 3 – пленка

Есть несколько способов уменьшить неравномерность. Можно увеличить расстояния от источника до подложки. Однако это приведёт к уменьшению скорости роста пленки; кроме того, максимальное расстояние ограничено размерами камеры. Кроме того, можно использовать сферический или планетарный подложкодержатель (рис. 1.4.7). При использовании сферического подложкодержателя неравномерность пленки по толщине снижается до 10%, а для планетарного – до 3...4%. Однако подобные установки имеют большую стоимость.

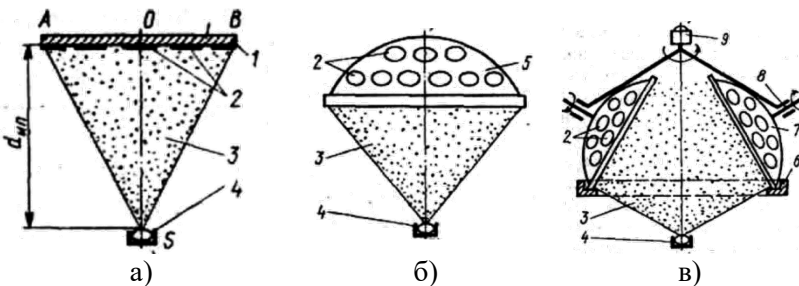


Рис. 1.4.7. Варианты подложкодержателей: а – плоский, б – сферический, в – планетарный

1, 5, 7 – подложкодержатели; 2 – подложки; 3 – поток осаждаемых частиц; 4 – точечный источник осаждаемых частиц; 6 – кольцо; 8 – ось подложкодержателя; 9 – приводная вращающаяся ось

Для испарения осаждаемого вещества можно использовать резистивные испарители с прямым или косвенным нагревом, электронно-лучевые или

индукционные испарители. В резистивных испарителях разогрев испаряемого вещества происходит пропусканием электрического тока через материал с высоким сопротивлением. Подобные нагреватели обладают высоким КПД, имеют малые габариты и низкую стоимость. Однако при этом они обладают малым ресурсом работы; кроме того, материал испарителя может загрязнить осаждаемую пленку. Основным материалом, используемым для резистивных испарителей, являются вольфрам, молибден и тантал.

Вид и форма резистивных испарителей зависит от вида осаждаемого вещества. Различают следующие виды испарителей:

- проволочные;
- ленточные;
- коробчатого типа;
- тигельные.

Проволочные испарители (рис. 1.4.8) применяются для испарения веществ, которые смачивают материал нагревателя. Их достоинством является простота конструкции, возможность модификации под конкретные технологические условия. Кроме того, они хорошо компенсируют расширение и сжатие при нагреве и охлаждении. Их недостатком является малое количество испаряемого за один процесс материала.

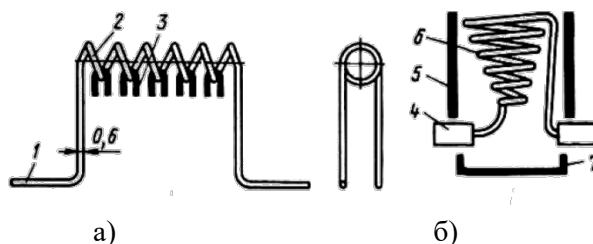
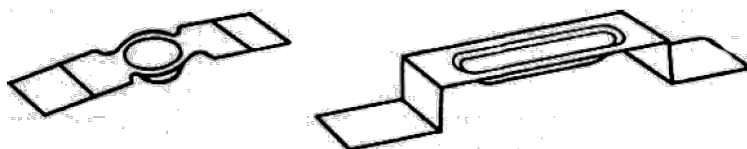


Рис. 1.4.8. Проволочные испарители: а – с цилиндрической спиралью; б – с конической спиралью

1 – отогнутый конец спирали; 2 – цилиндрическая спираль; 3 – испаряемый материал (гусарик); 4 – зажимы токоподвода; 5, 7 – цилиндрический тепловой и ограничивающий экраны; 6 – коническая спираль

Ленточные испарители (рис. 1.4.9) применяются для испарения материалов, плохо удерживающихся на проволочных испарителях, а также для диэлектрических материалов.



а) б)
Рис. 1.4.9. Ленточные испарители: а – с углублением в виде полусферы; б – лодочного типа

Для неметаллических веществ, например, диэлектриков, обладающих низкой теплопроводностью в вакууме, существует большая вероятность из разбрызгивания при форсированном испарении. В этих случаях применяют испарители коробчатого типа (рис. 1.4.10), выполненные из ленты толщиной 0,1 мм в виде коробочки, в которую засыпают испаряемое вещество 5. Сверху коробочка закрывается однослойным или двухслойным экраном 3 с отверстиями, через которые проходят пары 4 наносимого материала. Иногда уменьшения разбрызгивания вещества используют двухслойные экраны, отверстия в которых располагают в шахматном порядке, что позволяет полностью исключить прямой пролет крупных частиц испаряемого вещества. Кроме того, такие испарители позволяют создавать над поверхностью испаряемого вещества ограниченное пространство, в котором образующийся пар близок к насыщенному.

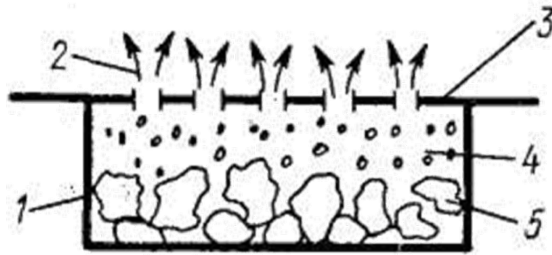


Рис. 1.4.10. Испаритель коробчатого типа
 1 – коробочка; 2 - поток паров наносимого вещества; 3 – экран; 4 - пары испаряемого вещества; 5 - испаряемое вещество

Наиболее эффективную защиту от разбрызгивания испаряемого вещества в виде капель, которым сопровождается процесс испарения некоторых веществ, обеспечивают лабиринтные испарители (рис. 1.4.11). Их конструкция исключает прямой путь для выхода крупных частиц вещества в момент взрывного испарения. Его изготавливают в виде коробочки 1, которая закрывается крышкой 5, имеющей боковой и нижней 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.

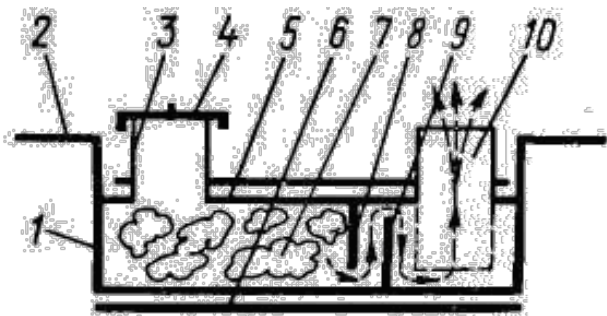


Рис. 1.4.11. Коробчатый испаритель лабиринтного типа

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

Для напыления многокомпонентных сплавов, составные части которых имеют разное давление образующегося пара, используется метод взрывного (дискретного) испарения (рис. 1.4.12). Сущность этого метода 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. Температура испарителя выбирается такой, чтобы происходило испарение наименее летучего вещества.

Основной недостаток данного метода – 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.

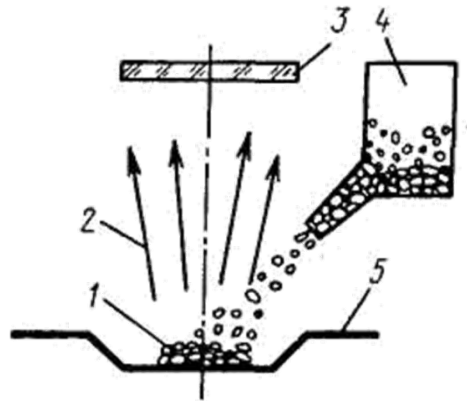


Рис. 1.4.12. Метод взрывного (дискретного) испарения

1 - испаряемый порошок; 2 - пары наносимого вещества; 3 - подложка; 4 - дозатор; 5 - ленточный испаритель

Для испарения большого количества сыпучих диэлектрических материалов используют тигельные испарители (рис. 1.4.13). Тигли изготавливают из тугоплавких металлов, кварца, графита, а также керамических материалов (нитрида бора, оксида алюминия). Есть 2 разновидности таких испарителей: с внутренним нагревателем (рис. 1.4.13 а) и внешним (рис. 1.4.13 б). При равной мощности питания первый испаритель нагревается до более высокой температуры, чем второй. Достоинством второго является отсутствие контакта испаряемого материала со спиральным нагревателем.

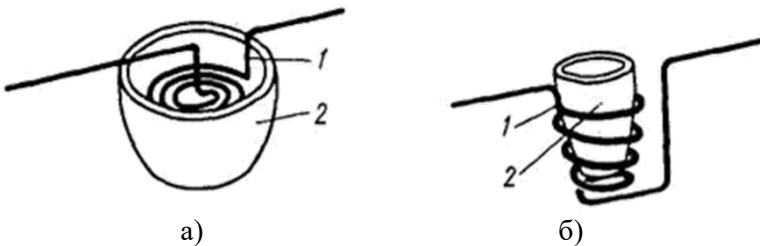


Рис. 1.4.13. Тигельные испарители: а – с внутренним спиральным нагревателем; б – с внешним спиральным нагревателем

1 – спираль; 2 – тигель

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.

Испарители с резистивным нагревом невозможно использовать для напыления тугоплавких металлов. В таком случае нужно использовать

электронно-лучевые испарители. Их принцип действия основан на преобразовании кинетической энергии электронов в энергию нагрева при бомбардировке ими испаряемого материала.

Подобные испарители из 3-х основных частей: электронная пушка, отклоняющая система, водоохлаждаемый тигель (рис. 1.4.14). Электронная пушка, в состав которой входят вольфрамовый термокатод 6 и фокусирующая система 7, формирует поток электронов. Электроны, эмитируемые катодом, разгоняются до 10 кЭв и формируются в электронный луч 8. Отклоняющая система предназначена для создания магнитного поля, перпендикулярного направлению скорости движения электронов. Она состоит из полюсных наконечников 1 и электромагнита 2. Между полюсными наконечниками расположены водоохлаждаемый тигель 3 и электронная пушка. Отклоняющая система с помощью магнитного поля направляет электронный луч в центр тигля. В месте падения луча создается локальная зона испарения вещества из жидкой фазы. Нагретый материал испаряется и осаждается в виде тонкой пленки на подложке. Изменяя ток в электромагните, можно сканировать лучом вдоль тигля, предотвращая образование «кратера» в испаряемом материале. Водоохлаждаемый тигель делается из меди. Емкость порядка 50 см³, что обеспечивает длительную работу без добавки материала. Испаряемый материал не контактирует со стенками тигля, что обеспечивает отсутствие загрязнения.

Электронно-лучевые испарители не загрязняют камеру материалом нагревателя и тигля и имеют большой срок эксплуатации. Однако они обладают рядом недостатков. При длительной бомбардировке некоторые материалы разлагаются на фракции. При этом они сложнее и дороже испарителей с резистивным нагревом. Кроме того, при их использовании возникают трудности при испарении металлов высокой теплопроводности (медь, алюминий, золото, серебро).

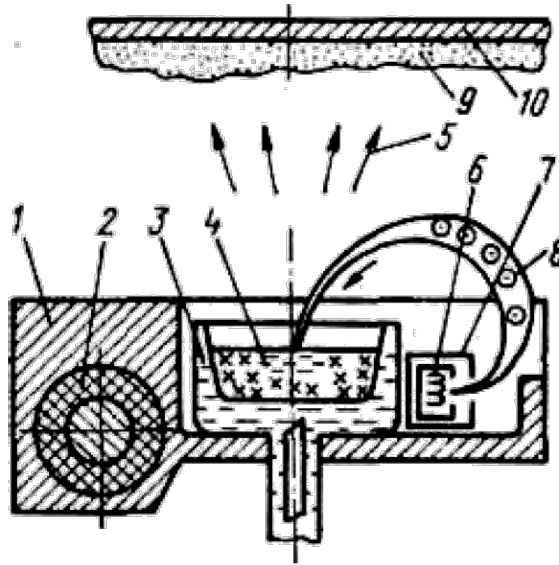


Рис. 1.4.14. Электронно-лучевой испаритель

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

Установки для термического вакуумного напыления имеют ряд недостатков:

- напыление плёнок из тугоплавких материалов (W , Mo , SiO_2 , Al_2O_3 и ряда других) требует высоких температур на испарителе, при которых неизбежно загрязнение потока материалом испарителя;
- при напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава плёнки по сравнению с исходным составом материала, помещённого в испаритель;
- инерционность процесса, требующая введения в рабочую камеру заслонки с электромагнитным приводом;
- высокая неравномерность толщины плёнки.

1.4.3. ИОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

Процесс распыления ионной бомбардировкой является «холодным» процессом, так как атомарный поток вещества на подложку создаётся путём бомбардировки поверхности твёрдого образца (мишени) ионами инертного газа и возбуждения поверхности атомов до энергии, превышающей энергию связи с соседними атомами. Необходимый поток ионов создаётся в

электрическом газовом разряде, для чего давление газа в рабочей камере должно быть на несколько порядков более высокое, чем в камере установки термовакuumного напыления. Благодаря относительно высокому давлению в камере повышается равномерность толщины осаждаемых плёнки до 1%, причём без применения дополнительных устройств.

Различают следующие системы ионного распыления:

- катодные (диодные) системы.
- ионно-плазменные (триодные) системы.
- магнетронные (высокочастотные) системы

Схема установки диодной системы распыления приведена на рисунке 1.41.15. Из рабочей камеры откачивается воздух и запускается инертных газ (аргон). Давление в камере составляет 1...10 Па. Если распыляемая мишень металлическая, то распыление ведется при постоянном токе, если диэлектрическая – при переменном.

При подаче напряжения между двумя электродами образуется разряд, который разделён на две зоны: тёмное катодное пространство и светящаяся область. На тёмное катодное пространство приходится основное падение напряжения. Здесь заряженные частицы разгоняются до энергии, достаточной, чтобы ионы, бомбардируя катод-мишень, освобождали поверхностные атомы и электроны (если мишень из проводящего материала), а электроны - на границе тёмного катодного пространства ионизировали молекулы аргона. При ионизации образуется ион аргона, который, ускоряясь, стремится к мишени, и электрон, который, как и "отработанный" ионизирующий электрон, дрейфует к аноду в слабом поле светящейся области. Освобожденный с поверхности мишени атом вещества, преодолевая столкновения с молекулами и ионами аргона, достигает поверхности подложки. Процесс ионизации является лавинообразным, поскольку при этом образуются дополнительный электрон. Непрерывный поток ионов бомбардирует мишень, вышибая из нее атомы вещества (рис. 1.4.16), которые затем непрерывным поток двигаются к подложке.

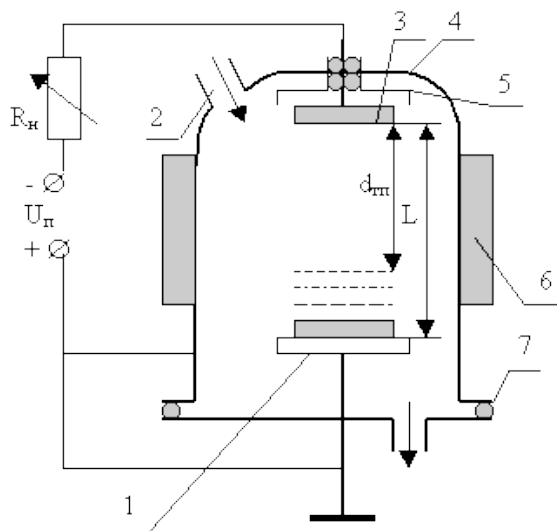


Рис. 1.4.15. Катодная (диодная) система распыления

1 – анод с размещенными на нём подложками; 2 – игольчатый натекаТЕЛЬ, обеспечивающий непрерывную подачу аргона; 3 – катод-мишень из материала, подлежащего распылению и осаждению; 4 – вакуумный колпак из нержавеющей стали; 5 – экран, охватывающий катод с небольшим зазором и предотвращающий паразитные разряды на стенки камеры; 6 – постоянный электромагнит, удерживающий электроны в пределах разрядного столба; 7 – герметизирующая прокладка

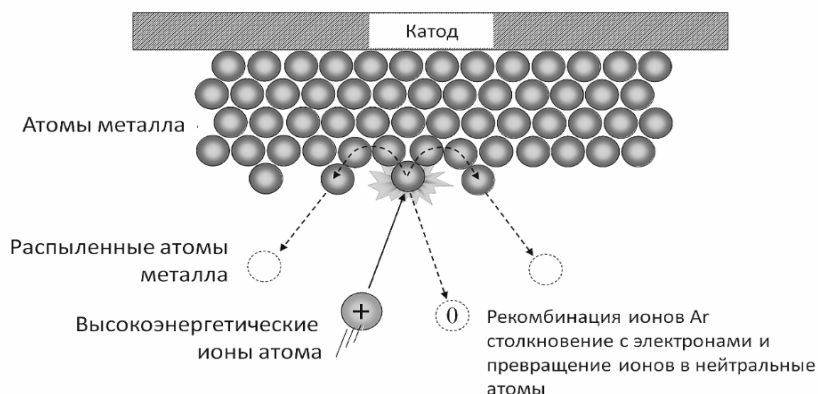


Рис. 1.4.16. Общая схема катодного распыления

Катодные системы имеют несколько недостатков:

- можно распылять только проводящие материалы, способных эмитировать в разряд электроны, ионизирующие

молекулы аргона и поддерживающие горение разряда;

- малая скорость роста плёнки (единицы нм/с) из-за значительного рассеивания распыляемых атомов материала в объёме рабочей камеры.

В ионно-плазменных (триодных) системах распыления (рис. 1.4.17) добавляется третий электрод, который выполняет функцию термоэмиссионного катода. Благодаря этому увеличивается концентрация электронов и, таким образом, ионизированных атомов рабочего газа (аргона). При этом увеличение количества ионов возможно при уменьшении его давления до $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Па, что обеспечивает нанесение пленок, не загрязненными посторонними примесями. Наличие 3-го электрода позволяет приблизить мишень к подложке, что позволяет увеличить скорость нанесения пленки. Электроны, испускаемые термокатодом, ионизируют атомы аргона, которые после подачи отрицательного потенциала на катод-мишень (3 – 5 кВ), вытягиваясь из плазмы, бомбардируют и распыляют поверхность.

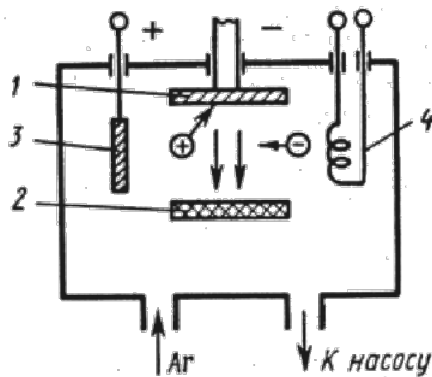


Рис. 1.4.17. Ионно-плазменная (триодная) система распыления
1 – катод-мишень; 2 – подложка; 3 – анод; 4 – термокатод

Более низкое давление обеспечивает нанесение пленок, не загрязненными посторонними примесями, а также увеличивает скорость нанесения пленки. При этом процесс безынерционный: распыление после снятия потенциала с катода-мишени прекращается. Недостатком метода является выделение большого количества теплоты в разрядной камере и на мишени, что требует системы охлаждения.

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили установки для магнетронного распыления (рис. 1.4.18).

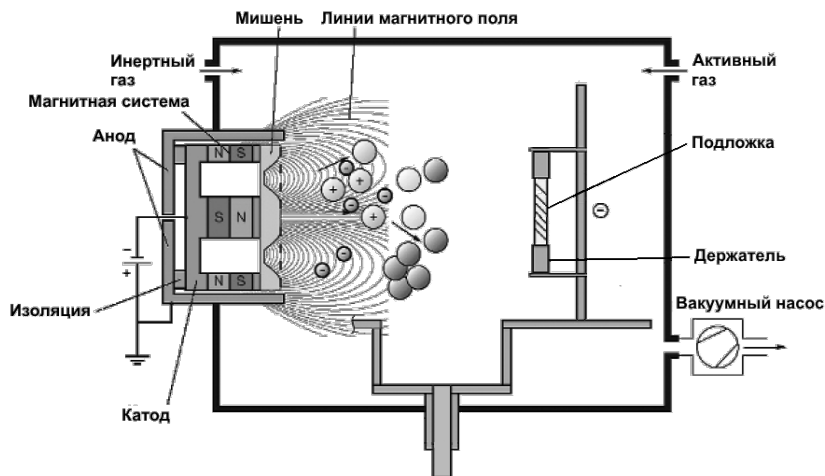


Рис. 1.4.18. Схема установки для магнетронного распыления

В них устанавливается магнетрон, накладывающий на разряд плазмы постоянное магнитное поле, вектор которого перпендикулярен вектору электрического поля. В результате движение электронов происходит по сложным (близким к циклоидам) траекториям, степень ионизации рабочего газа существенно повышается, что даёт возможность снизить давление газа, не снижая (и даже повышая) разрядный ток. В результате скорость роста плёнки повы до нескольких нм/с, что сравнимо со скоростями в процессах термического вакуумного напыления.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ 4

Вопрос 1	Какие компоненты можно получить с помощью тонкопленочной технологии?
Ответы:	
1	Резисторы, конденсаторы, индуктивности и другие пассивные компоненты
2	Любые компоненты
3	Активные компоненты
Вопрос 2	Какой способ получения тонких пленок в настоящее время в основном используется?
Ответы:	
1	Магнетронное распыление
2	Термическое испарение
3	Диодное распыление