

1.16. ОСНОВЫ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Цель лекции: изучение особенностей применения вакуумной техники в приборостроении.

1.16.1. ВВЕДЕНИЕ В ВАКУУМНУЮ ТЕХНИКУ

Вакуум (от лат. *vacuus* — пустой) — пространство, свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного.

Вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа λ и характерным размером среды d .

Под d может приниматься расстояние между стенками вакуумной камеры, диаметр вакуумного трубопровода и т. д. Длина свободного пробега молекул газа зависит от давления табл. 1.21.

Таблица 1.21.

Длина свободного пробега молекул газа при различном давлении							
Р, Па (торр)	10^5 (760)	10^1 (10^0)	10^0 (10^{-2})	10^{-1} (10^{-3})	10^{-2} (10^{-4})	10^{-3} (10^{-5})	10^{-4} (10^{-6})
λ , см	7,2 10^{-6}	0,055	0,55	5,5	55	550	550

Условное деление областей вакуума

В вакуумной технике различают четыре основных степени вакуума: низкий, средний, высокий и сверхвысокий рис. 1.138.



Рис. 1.138. Условное деление областей вакуума

Для количественной оценки степени вакуума вводится число Кнудсена: $Kn = \lambda/L$, где L — характерный размер вакуумного объема, λ — средняя длина свободного пробега.

Область давлений, когда средняя длина свободного пробега молекул много меньше характеристических размеров вакуумного объема, например, высоты рабочей камеры, отвечает низкому вакууму. Низкий вакуум соответствует $Kn \ll 1$.

Область давлений, когда средняя длина свободного пробега молекул совпадает с характерным размером вакуумного объема, получила название среднего вакуума. В этом диапазоне давлений столкновения молекул со стенками и друг с другом равновероятны. Средний вакуум отвечает условию: $Kn \sim 1$.

В области высокого и сверхвысокого вакуума средняя длина свободного пути молекул много больше размеров вакуумного объема, и молекулы преимущественно сталкиваются со стенками сосуда. В этом случае каждая молекула выступает индивидуально, а процессы в газах называется молекулярными. В высоком вакууме справедливо условие $Kn \gg 1$.

1.16.2. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА ТИПОВОЙ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

Для получения вакуума в промышленности используются вакуумные установки. На рис. 1.139. представлена принципиальная схема вакуумной установки.

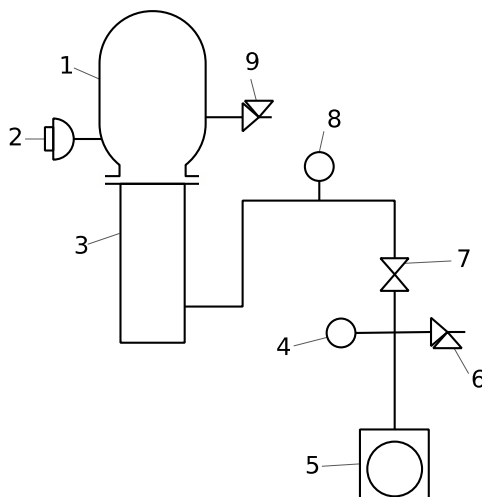


Рис. 1.139. Схема типовой вакуумной установки

1 – рабочая камера; 2- ионизационный вакуумметр; 3 - высоковакуумный насос; 4, 8 – термомпарный вакуумметр; 5 – форвакуумный насос; 6, 9 – клапан впуска воздуха.

Имеется рабочая камера, в которой создается вакуум при помощи нескольких вакуумных насосов, которые соединены трубопроводами с рабочей камерой. Вакуумные трубопроводы снабжены рядом клапанов, которые выполняют функции перекрытия или открытия определенных участков в зависимости от потребности. Имеются также приборы, измеряющие степень вакуума. На рис.1.140. Представлена классификация вакуумных насосов.

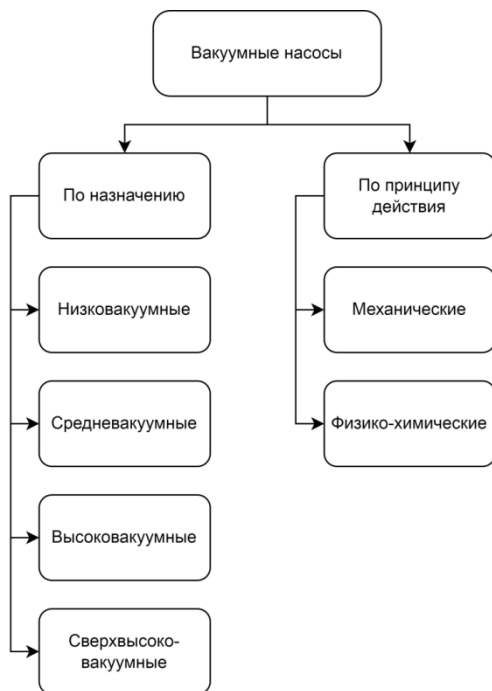


Рис. 1.140. Классификация вакуумных насосов

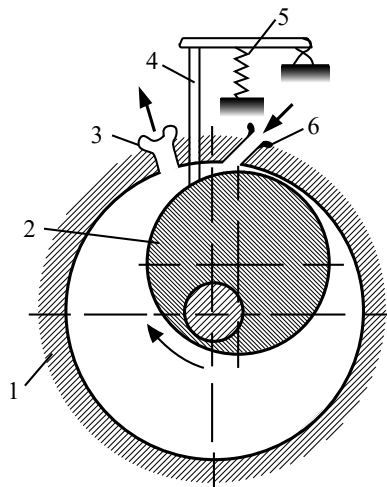


Рис. 1.141. Схема форвакуумного насоса

1 – корпус; 2 – ротор; 3 – выпускной патрубок; 4 – пластинчатый клапан; 5 – пружина; 6 – входной патрубок

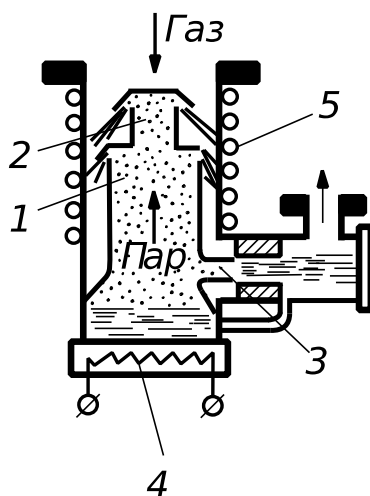


Рис. 1.142. Схема диффузионного насоса

1 – первая диффузионная ступень; 2 – вторая диффузионная ступень; 3 – эжекторная ступень; 4 – электроплитка; 5 – трубки системы охлаждения.

Форвакуумный насос рис.1.141 является низковакуумным насосом первой ступени. Принцип его действия следующий. В корпусе 1 вращается ротор 2, в результате чего периодически меняется объем пространства внутри корпуса 1. При сжатии воздуха он выходит через выпускной патрубок 3, снабженный

пластинчатым клапаном 4, а при расширении объема в него входит воздух через входной патрубок 6.

Достоинства форвакуумного насоса – простота конструкции, относительно высокая производительность, дешевизна.

Недостаток – невозможность получения высокого вакуума.

Диффузионный насос рис.1.142 является высоковакуумным насосом. Принцип его действия основан на захвате молекул газа парами масла, которое испаряется в результате нагрева электроплиткой. Пары масла с захваченными молекулами газа откачиваются форвакуумным насосом.

Достоинства диффузионного насоса – простота конструкции, дешевый. Недостаток – низкая производительность, требует периодической замены масла.

Принцип действия турбомолекулярного насоса рис.1.143. следующий. При вращении ротора 4 молекулы газа сталкиваются с вращающимися роторными дисками 7 и под действием центробежной силы отбрасываются в сторону выпускного фланца. При этом скорость вращения ротора составляет до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту.

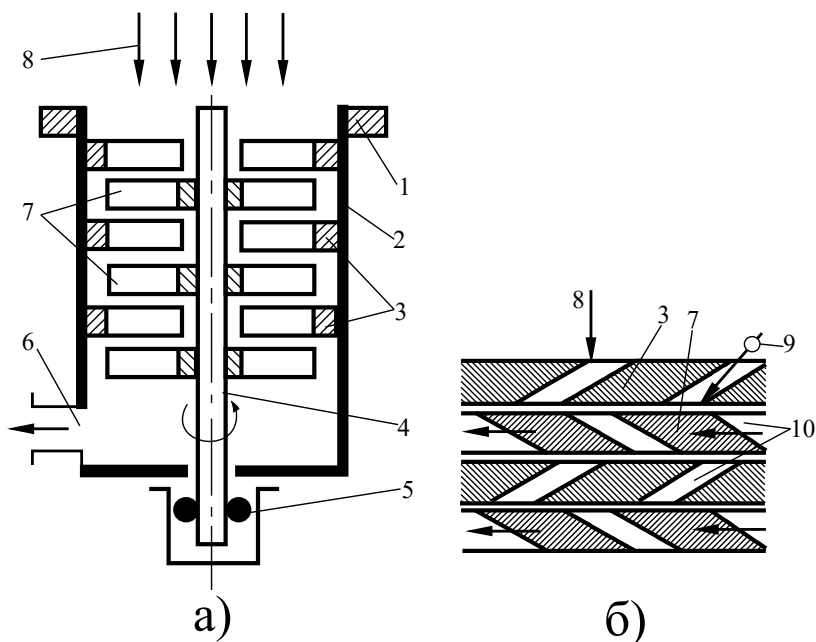


Рис. 1.143. Схема турбомолекулярного насоса.

а) Общий вид в разрезе, б) – фрагмент роторных и статорных дисков в разрезе. 1,6 – впускной и выпускной фланцы, 2 – корпус, 3 – статорные диски, 4 – ротор, 5 – подшипник, 7 – роторные диски, 8 – поток откачиваемого газа, 9 – молекула откачиваемого газа, 10 – прорези в дисках.

Достоинства турбомолекулярных насосов

- обеспечивают безмасляный сверхглубокий вакуум;
- могут работать с инертными и коррозионными газами;
- могут перекачивать большой объем газа;
- большой диапазон рабочих давлений;
- быстро запускаются;
- простота обслуживания;
- хорошая перекачка тяжелых газов.

Недостатки турбомолекулярных насосов:

- небольшой дисбаланс лопастей ротора может вызвать вибрации и износ подшипников;
- внезапный скачок атмосферного давления может повредить лопасти и стать причиной поломки насоса;
- смазка высокоскоростного ротора сложная задача;
- подшипники, смазываемые консистентной смазкой «слабая» часть в насосе.

1.16.3. ПРОЦЕССЫ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ**Вакуумное напыление**

Вакуумное напыление - нанесение пленок или слоев на поверхность деталей или изделий в условиях вакуума (10^{-1} - 10^{-7} Па). Вакуумное напыление используют в планарной технологии полупроводниковых микросхем, в производстве тонкопленочных гибридных схем, изделий пьезотехники, акустоэлектроники и др. (нанесение проводящих, диэлектрических, защитных слоев, масок и др.), в оптике (нанесение просветляющих, отражающих и др. покрытий), ограниченно - при металлизации поверхности пластмассовых и стеклянных изделий, тонировании стекол автомобилей.

Методом вакуумного напыления наносят металлы (Al, Au, Cu, Cr, Ni, V, Ti и др.), сплавы (например, NiCr, CrNiSi), химические соединения (силициды, оксиды, бориды, карбиды и др.), например I_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, Ta_2O_5 , GeO_2 .

Вакуумное напыление основано на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий и их конденсации.

Процесс включает несколько стадий:

- переход напыляемого вещества или материала из конденсированной фазы в газовую;
- перенос молекул газовой фазы к поверхности изделия;
- конденсацию их на поверхность;
- образование и рост зародышей, формирование пленки.

На рис. 1.144 представлена классификация видов вакуумного напыления. Оно подразделяется на вакуумное (термическое) испарение и ионное распыление.

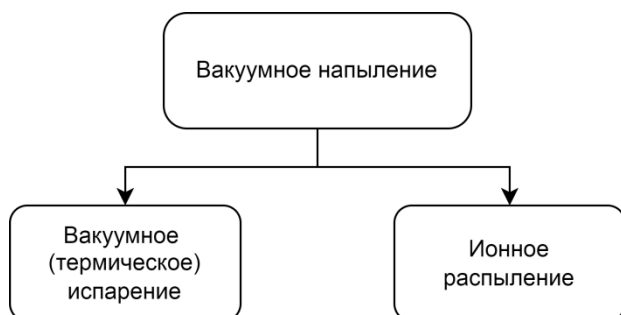


Рис. 1.144. Классификация видов вакуумного напыления по способу перевода вещества из конденсированной в газовую фазу

При вакуумном испарении исходный материал испаряется в вакууме за счет, например, его нагрева электрическим током (рис. 1.145). Вакуум позволяет частицам пара конденсироваться непосредственно на напыляемом изделии (подложке).

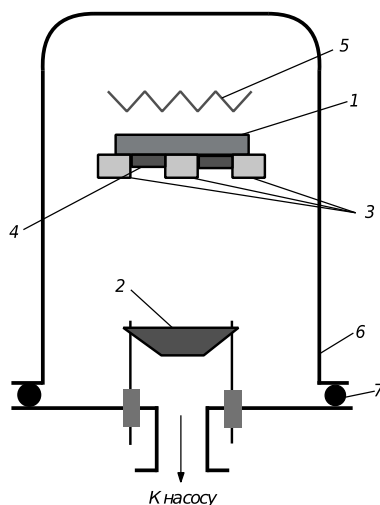


Рис. 1.145. Схема испарительной части вакуумной установки

1 – подложка; 2 – лодочка с испаряемым металлом; 3 – маска; 4 – пленка напыляемого металла; 5 – электронагреватель; 6 – корпус вакуумной камеры; 7 – уплотнительное кольцо.

Испаряемый материал закладывается в контейнер, называемый лодочкой, через который пропускают электрический ток. В результате материал в лодочке испаряется и попадает на подложку. Как правило, на подложке уста-

новлена маска, защищающая от напыления определенные места на подложке. Таким образом, на подложке формируется необходимая конфигурация проводников.

Адсорбция

Попадающий на поверхность подложки атом (или молекула) испытывает воздействие двух сил:

силы притяжения Ван-дер-Ваальса и силы отталкивания.

Потенциальная энергия взаимодействия рис.1.146. $E(r)$ падающего атома с атомами на поверхности в этом случае может быть записана в виде суммы:

$$E(r) = E_{\text{пр}}(r) + E_{\text{от}}(r)$$

где $E_{\text{пр}}(r)$ энергия притяжения

$E_{\text{от}}(r)$ энергия отталкивания

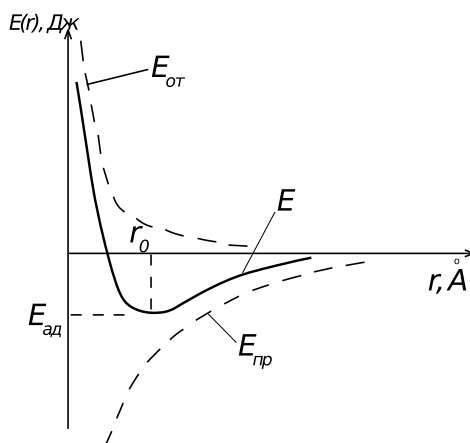


Рис. 1.146. Схема изменения потенциальной энергии взаимодействия $E(r)$ падающего атома с атомами на поверхности подложки

r_0 – расстояние минимума полной потенциальной энергии

$E_{\text{ад}}$ – энергия адсорбции

E – полная потенциальная энергия атомов, падающих на подложку

В результате взаимодействия вышеуказанных сил процесс роста напыляемой пленки можно разделить на следующие стадии:

- образование островковой пленки;
- коалесценция (срастание) островков;
- образование сетчатой структуры;
- формирование сплошной пленки;

Ионное распыление

При ионном распылении рис. 1.147. частицы наносимого вещества выбиваются с поверхности конденсируемой фазы путем ее бомбардировки ионами низкотемпературной плазмы. Вариантами ионного распыления являются катодное, магнетронное, ионно-плазменное и высокочастотное распыление, которые отличаются друг от друга условиями формирования и локализацией в пространстве низкотемпературной плазмы. Если распыление проводится в присутствии химических реагентов (в газовой фазе), то на поверхности изделия образуются продукты их взаимодействия с распыляемым веществом (например, оксиды, нитриды). Такое распыление называют реактивным.

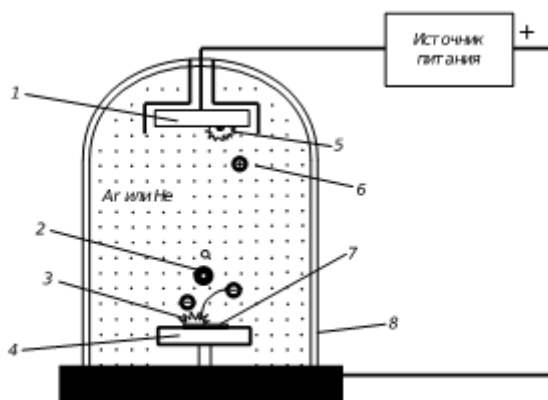


Рис. 1.147. Схема ионного распыления

1 – катод (мишень); 2 – напыляемый атом вещества; 3 – электроны, индуцированные вторичной эмиссией; 4 – анод; 5 – ионы, индуцирующие вторичную эмиссию; 6 – бомбардирующий ион; 7 – подложка (образец); 8 – корпус вакуумной камеры.

Атомы или молекулы, достигшие поверхности, могут либо отразиться от нее, либо адсорбироваться и через некоторое время покинуть ее (десорбция), либо адсорбироваться и образовывать на поверхности конденсат (конденсация). При высоких энергиях частиц, большой температуре поверхности и малом химическом средстве частица отражается поверхностью.

Температура поверхности детали, выше которой все частицы отражаются от нее и пленка не образуется, называется критической температурой вакуумного напыления; ее значение зависит от природы материалов пленки и поверхности детали и от состояния поверхности. При очень малых потоках испаряемых частиц, даже если эти частицы на поверхности адсорбируются, но редко встречаются с другими такими же частицами, они десорбируются и не могут образовывать зародышей, т.е. пленка не растет.

Критической плотностью потока испаряемых частиц для данной температуры поверхности называется наименьшая плотность, при которой частицы конденсируются и формируют пленку.

Структура напыленных пленок зависит от свойств материала, состояния и температуры поверхности, скорости напыления.

Пленки могут быть аморфными (стеклообразными, например оксиды, Si), поликристаллическими (металлы, сплавы, Si) или монокристаллическими (например, полупроводниковые пленки).

Процессы ионно-плазменного травления

На рис. 1.148 представлена классификация процессов ионно-плазменного травления. Эти процессы осуществляются в среде плазмы.

Плазма – это частично или полностью ионизированный газ, состоящий из положительно и отрицательно заряженных частиц, суммарный заряд которых равен нулю. Плазма подчиняется газовым законам, но проводит электрический ток и управляется магнитным полем.

Разновидности плазмы:

- низкотемпературная или холодная, температура холодной плазмы – несколько единиц электронвольт;
- высокотемпературная или горячая, температура горячей плазмы составляет сотни электронвольт.

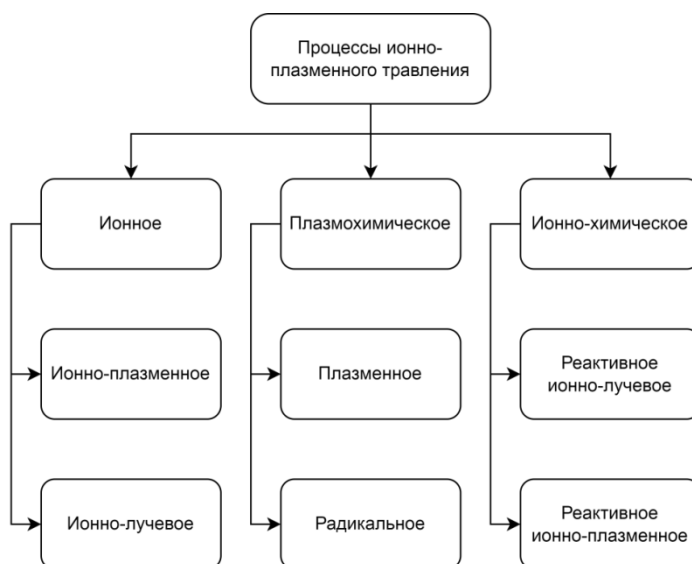


Рис. 1.148. Классификация процессов ионно-плазменного травления

Ионное травление – это такое травление, при котором для удаления поверхностных слоёв материала (металл, полупроводник, диэлектрик и даже ор-

ганические вещества) используется кинетическая энергия ионов газа. Обычно в качестве среды используют инертные газы, но в отдельных случаях используют также кислородную плазму, плазму фреонов и другие вещества, позволяющие добиться требуемого технологического результата рис.1.149.

Ионно-плазменное травление – это когда образцы помещаются на отрицательный электрод газоразрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами, вытягиваемыми из плазмы разряда.

Ионно-лучевое травление – это когда образцы помещают на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируют ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника.

При ионно-лучевом травлении может применяться фокусировка ионных пучков с помощью магнитных и электрических полей, а также компенсация их объёмного заряда с помощью инжекции электронов.

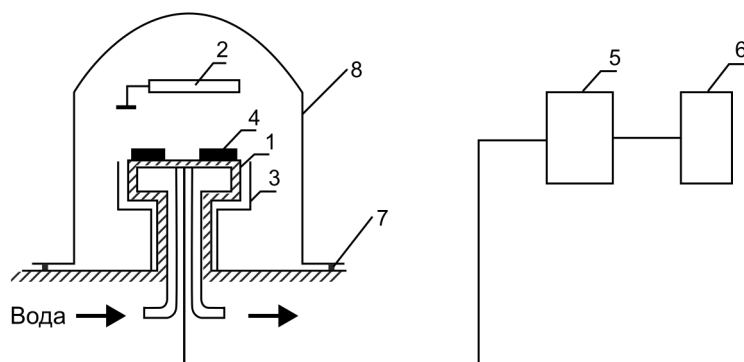


Рис. 1.149. Схема диодной ВЧ системы ионного травления

1 – мишень; 2 – анод; 3 – экран; 4 – образцы для травления; 5 – согласующее устройство; 6 – ВЧ-генератор; 7 – кольцевая резиновая прокладка; 8 – рабочая вакуумная камера.

Ионное травление применяется для:

- очистки поверхностей различных материалов от загрязнений и адсорбированных газов с целью получения атомно чистых поверхностей, используемых в качестве подложек для нанесения пленок в микроэлектронике
- выявления строения поверхностных слоев материалов, например, для образцов металлографических исследований
- трехмерной механической обработки любых материалов, с целью придания им необходимой формы и размеров
- полировки оптических поверхностей
- получения особо тонких пленок и пластин из различных материалов (например, СВЧ-резисторы, маски для рентгенографии)

- фрезерования поверхностей пластин из «драгоценных» радиоэлектронных материалов (ортоферритов и гранатов, используемых для создания ЗУ на ЦМД). В таких материалах плазменная обработка повышает подвижность доменов, благодаря улучшению поверхности

Ионное травление обладает наибольшей эффективностью из известных способов очистки материалов.

Физический механизм удаления материалов позволяет применять процесс для любых материалов (металлы, полупроводники и т.п.), поэтому отпадает необходимость разработки специальных травителей для существующих и перспективных материалов в электронике и микроэлектронике.

После ионного травления не нужны вспомогательные операции очистки, промывки и сушки образцов. Процесс ионного травления проводят в вакуумных камерах, что обеспечивает необходимую стерильность, предотвращает загрязнения

При ионном травлении можно обеспечить такой режим, при котором ионы бомбардируют материал перпендикулярно к его поверхности рис.1.150. Это исключает подтравливание под маской, способствует получению чётких и резко очерченных краёв элементов микроэлектронных приборов, снижает требования к высокой адгезии маскирующих материалов, минимизирует размер, задаваемый маской.

Фигуры травления получаются с вертикальными стенками и с большими отношениями глубины и ширины.

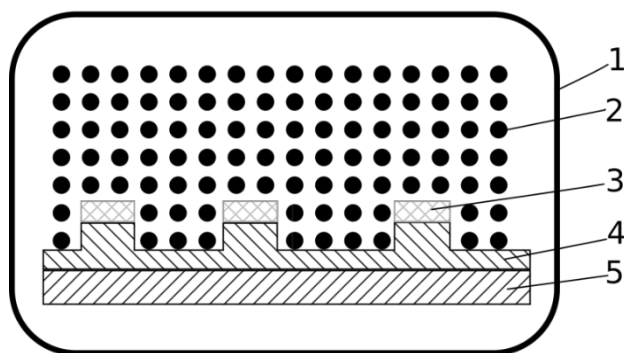


Рис. 1.150. Схема ионного травления

1 – рабочая вакуумная камера; 2 – поток ионов; 3 – маска; 4 – стравливаемый слой пленки; 5 – подложка или нижележащий слой

Недостатки ионного травления:

- малая скорость процесса травления, потому что применяемые для маскирования рабочих поверхностей материалы фоторезистивных масок не допускают нагрева выше температуры 500К
- высокоэнергичные заряженные частицы могут создавать в полупроводниковых структурах, радиационное излучение (МОП структуры особенно к этому чувствительны)
- низкая селективность при одновременном травлении нескольких материалов, поскольку большинство из них имеет близкие по значению коэффициенты распыления, а следовательно, и скорость травления.

Учитывая недостатки для селективного травления последовательно применяют разные маски, следовательно это вызывает усложнение процесса. Фоторезист при этом приходится наносить значительной толщины, что уменьшает разрешающую способность метода.

Плазмо-химическое травление

В операции плазмо-химического травления для удаления поверхностных слоёв материала используют реакции взаимодействия между ионами и радикалами активного газа или пара и атомами или молекулами обрабатываемой детали, с образованием летучих стабильных соединений рис.1.151. В зависимости от среды, в которую помещают образцы или детали, плазмо-химическое травление подразделяют на два процесса: плазменное травление и радикальное травление.

Плазменное травление - это когда образцы помещают в газоразрядную плазму химически активных газов.

Радикальное травление, когда образцы помещают в вакуумную камеру, отделённую от газоразрядной химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами или электромагнитными (магнитными) полями. Травление осуществляется незаряженными химически активными частицами (свободными атомами или радикалами), поступающими из газоразрядной плазмы. Этими методами можно травить даже биологические образцы.

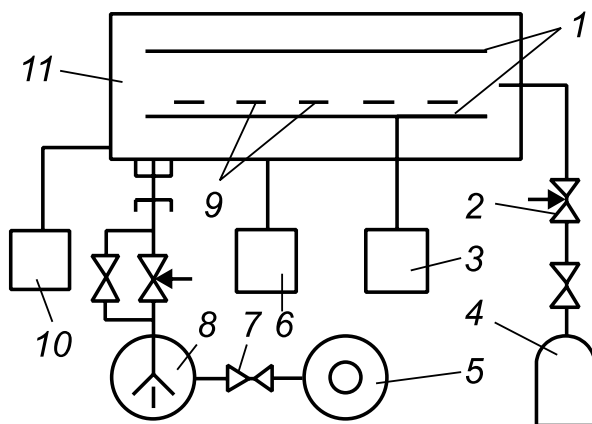


Рис. 1.151. Схема автоматической установки плазмо-химического травления с диодной высокочастотной системой:

1 – электроды, 2 – натекатель, 3 – блок управления ВЧ источника питания, 4 – система откачки, 5 и 8 – механический и диффузионный насосы, 6 – блок управления последовательностью операций, 7 – вентиль, 9 – подложка, 10 – регулятор давления, 11 – рабочая камера.

Плазмо-химическое травление – один из наиболее эффективных процессов, одновременно обеспечивающий и травление и очистку пластин рис. 1.152. Данный процесс выполняется в вакуумных реакторах в низкотемпературной смеси кислорода с азотом. При $T = 150 - 200^\circ \text{C}$ ионы кислорода активно окисляют слой фоторезиста, образуя летучие соединения. Азот предохраняет открытые участки кремния от окисления. Длительность обработки существенно сокращается по сравнению с жидкостными методами.

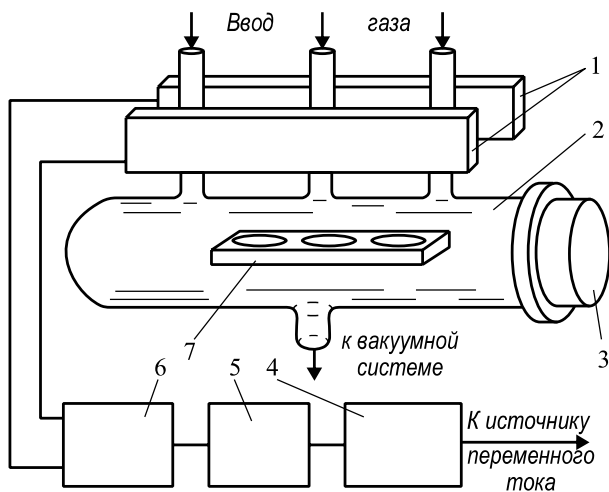


Рис. 1.152. Однокамерная установка плазмо-химического удаления фоторезиста с емкостной системой возбуждения ВЧ-разряда:

1 – электроды возбуждения разряда, 2 - реакционно-разрядная камера, 3 - крышка, 4 – ВЧ-генератор, 5 - ваттметр, 6 - активатор ВЧ плазмы, 7 - держатель с пластинами.

Реактор рис.1.152. представляет собой реакционно-разрядную камеру в виде кварцевой трубы 2, закрываемую крышкой 3, внутри камеры расположен держатель 7 с пластинами. Разряд возбуждается электродами возбуждения разряда 1 при помощи ВЧ-генератора 4 и активатора ВЧ плазмы 6.

Достоинства метода: слабая зависимость процесса удаления фоторезиста от режимов задубливания; высокая чистота подложек; нетоксичность.

Недостатки метода:

- невозможность удаления посторонних металлических включений, возможны радиационные дефекты.
- трудность получения воспроизводимых параметров процесса (скорости и однородности травления) из-за нестабильности температуры, неустойчивости состава среды, связанного с натеканием, газовыделением материалов;
- подтравливание, увеличивающееся с ростом давления газа;
- трудности контроля распределения состава газовой среды в рабочем пространстве оборудования.

Плазмо-химическое травление применяется:

- для удаления фоторезистивных масок после травления;
- очистки поверхностей материалов от загрязнений;
- обработки поверхностей контактных площадок перед приваркой выводов ИС с целью повышения качества соединений;
- подгонки номиналов резисторов и т.п.

Наиболее важным является применение плазмо-химического травления для селективного травления рабочих материалов через фоторезистивные маски для получения конфигураций микросхем.

Ионно-химическое травление

Ионно-химическое травление - операция, при которой для удаления поверхностных слоев материала используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химической реакции с атомами или молекулами материала. Используются различные схемы установок ионно-химического травления рис.1.153: диодная (а), триодная (б), планарная магнетронная (в) систем электродов.

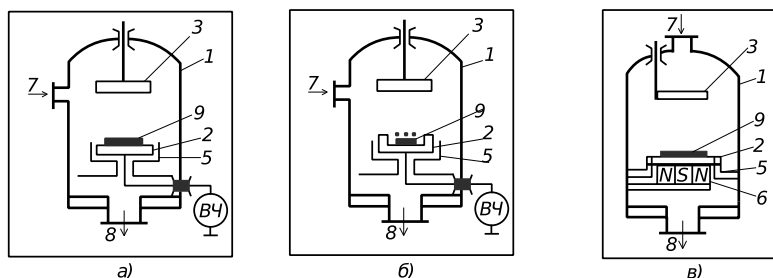


Рис. 1.153.Схемы установок ионно-химического травления

диодная (а), триодная (б), планарная магнетронная (в) систем электродов.

1 – камера; 2 – ВЧ-электрод; 3 – заземленный электрод; 4 – третий электрод; 5- экран; 6- магнитная система; 7 – нагреватели; 8 – откачка; 9 – подложка (заготовка).

Травление изделий происходит путем бомбардировки поверхности изделий ионами и радикалами технологического газа, образующимися в индукционном ВЧ-разряде при помощи источника ионов высокой плотности.

В зависимости от способов получения ионов и среды, ионно-химическое травление подразделяется на:

- **реактивное ионно-плазменное травление** – это когда образцы помещаются на электрод газоразрядного устройства и подвергаются бомбардировке ионами химически активных газов, вытягиваемых из плазмы разряда;
- **реактивное ионно-лучевое травление** – это когда образцы помещаются на мишени в высоковакуумной рабочей камере и бомбардируются ионами химически активных газов, вытягиваемых из автономного источника. Хорошие результаты получаются при травлении объемных фигур в полиимиде рис. 1.154

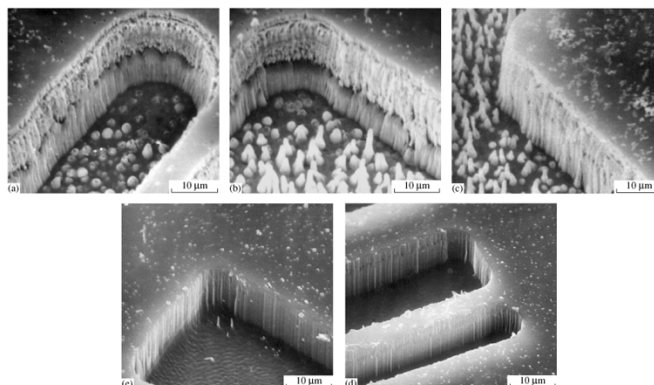


Рис. 1.154. Объемные фигуры в полиимиде, полученные методом реактивного ионно-лучевого травления(угол съемки 60°, алюминиевая маска удалена) [50]

Ионно-химическое травление

Ионно-химическое травление (ИХТ) применяется для того же, что и ПХТ. Оно позволяет совместить высокую скорость травления материалов с избирательностью, повысить разрешающую способность и обеспечить контроль профилей, получаемых при травлении.

К ограничениям метода следует отнести возможность загрязнения обрабатываемых структур чужеродными материалами ионного источника и мишени, а также радиационные загрязнения поврежденных структур.

Технологические возможности ионно-химического травления определяются конструктивными особенностями систем, в которых она реализуется.

ТЕСТЫ К ЛЕКЦИИ

Вопрос 1	Сколько степеней вакуума различают в технике?
Ответы:	
1	Четыре
2	Пять
3	Три
Вопрос 2	Какую степень вакуума позволяет получить форвакуумный насос?
Ответы:	
1	Низкую
2	Среднюю
3	Высокую
Вопрос 3	Какую степень вакуума позволяет получить диффузионный насос?
Ответы:	
1	Высокую
2	Среднюю
3	Низкую
Вопрос 4	Какую степень вакуума позволяет получить турбомолекулярный насос?
Ответы:	
1	Высокую
2	Среднюю
3	Низкую
Вопрос 5	На чем основано вакуумное напыление материалов?
Ответы:	

1	Вакуумное напыление основано на создании направленного потока частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала на поверхность изделий и их конденсации
2	Вакуумное напыление основано на распылении микрочастиц исходного материала потоком воздуха
3	Вакуумное напыление основано на растворении частиц (атомов, молекул или кластеров) наносимого материала в вакуумной среде
Вопрос 6	На чем основано ионное распыление?
Ответы:	
1	При ионном распылении частицы наносимого вещества выбиваются с поверхности конденсируемой фазы путем ее бомбардировки ионами низкотемпературной плазмы
2	При ионном распылении создается направленный поток ионов, который осаждается на подложке
3	При ионном распылении создается высокий вакуум, в котором образуются ионы, осаждающиеся на подложке
Вопрос 7	Что такое ионное травление материала?
Ответы:	
1	Ионное травление – это технологическая операция, при которой для удаления поверхностных слоёв материала используется кинетическая энергия ионов газа
2	Ионное травление – это такое травление, при котором для удаления поверхностных слоёв материала используют ионный раствор кислот
3	Ионное травление – это такое травление, при котором для удаления поверхностных слоёв материала используют ионный раствор щелочей
Вопрос 8	Что такое ионно-химическое травление материала?
Ответы:	
1	Это технологическая операция, при которой для удаления поверхностных слоев материала используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов, так и энергия их химической реакции с атомами или молекулами материала
2	Это технологическая операция, при которой для удаления поверхностных слоев материала используется химическая реакция в травящем растворе кислот
3	Это технологическая операция, при которой для удаления поверхностных слоев материала используется химическая реакция в травящем растворе щелочей