

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Телеш Е.В.

Конспект лекций

по дисциплине

”Специальное технологическое оснащение ”

для специальности **1-39 02 04 "Проектирование и производство РЭС"**

Минск 2007

Содержание

Вводная лекция.....	3
Тема 1. Оборудование для резки слитков и механической обработки пластин полупроводниковых материалов.....	5
Тема 2. Оборудование для очистки поверхности полупроводниковых подложек.....	16
Тема 3. Системы нагрева в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.....	22
Тема 4. Газовые системы в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.....	27
Тема 5. Основы вакуумной техники.....	33
Тема 5.1. Методы измерения вакуума	33
Тема 5.2. Откачные средства вакуумных систем.....	42
Тема 6. Оборудование для наращивания эпитаксиальных слоев.....	57
Тема 7. Оборудование для термических диффузий и окисления.....	66
Тема 8. Оборудование для ионной имплантации.....	80
Тема 9. Оборудование для процессов литографии.....	92
Тема 10. Оборудование для нанесения покрытий в вакууме.....	106
Тема 11. Оборудование для получения покрытий из газовой фазы и из жидкостных сред.....	120
Тема 12. Оборудование для процессов травления твердотельных структур.....	131
Тема 13. Сборочное оборудование.....	144
Тема 14. Оборудование для герметизации.....	160
Тема 15. Контрольно-измерительное и испытательное оборудование..	170
Тема 16. Оборудование для подготовки технологических сред.....	180
Тема 17. Автоматизированное и программно-управляемое технологическое оборудование.....	190

Вводная лекция

В настоящее время сложность производства микроэлектронных изделий с переходом на кремниевые пластины большого диаметра (300 мм), уменьшением размеров элементов (до 0,09 мкм), сложностью конструкции ИС(переход с двухмерных к трехмерным структурам), повышенным требованиям к чистоте технологических сред (реагентов, газов, жидкостей, атмосферы производственных помещений), высокая точность поддержания технологических параметров (температура, давление, энергия, доза, расход и т.п.).

Современное полупроводниковое производство – комплекс сложнейших операций от входного контроля исходных материалов до окончательной сборки готового прибора, его испытания и упаковки, для изготовления ИС или ППП необходимо выполнить сотни технологических и контрольно – измерительных операций. Так, для изготовления простого диода необходимо применение более 80 единиц специального оборудования.

Высокое требование к технологии, к оборудованию определяется спецификой ИС или полупроводникового прибора – весь процесс изготовления прибора протекает в одном объеме и заменить в нем хотя бы один неправильно изготовленный элемент нельзя и брак на одной операции приводит к браку кристалла в целом.

Основные тенденции в развитии технологическое оборудования микро электроники:

- агрегатирование машин на основе интеграции технологических процессов;
- высокая степень автоматизации за счет применения микропроцессов, контроллеров, компьютеров и датчиков оперативной информации хода ТП;
- применение конвейерно-адресных устройств и роботов;
- снижение стоимости материала - и энергопотребления машин;
- использование « сухих» методов обработки.

Под понятием «технологическое оснащение» подразумевается сочетание технологического оборудования и технологической оснастки. К последней относятся, например, пинцеты, держатели, лодочки, кассеты и т.п.

Оборудование подразделяется на:

- технологическое;
- измерительное;
- испытательное;
- вспомогательное.

Классификация технологического оборудования:

- по назначению;

- по рабочей температуре до 900° и больше 1300 °С;
- по принципу действия.
 - периодического действия;
 - непрерывного действия.
- по конструкции:
 - вертикальная;
 - горизонтальная.
- по степени автоматизации.

Оборудование для резки слитков и механической обработки пластин полупроводниковых материалов

Полупроводниковые материалы, обладающие высокой твердостью и хрупкостью, не поддаются механической обработке с применением большинства обычных методов, таких, как точение, фрезерование, сверление, штамповка и т. п. Практически единственным методом, применимым для механической обработки полупроводниковых материалов, является обработка с применением связанных или свободных абразивов.

Метод резки монокристаллов на пластины металлическим диском с внутренней алмазной режущей кромкой (рис.1.1) в настоящее время практически вытеснил все ранее применявшиеся методы резки: дисками с наружной алмазной режущей кромкой, полотнами и проволокой с применением абразивной суспензии. Этот способ получил наибольшее распространение потому, что он обеспечивает более высокую производительность при меньшей ширине реза, в результате чего потери полупроводникового материала снижаются почти на 60 % по сравнению с резкой диском с наружной режущей кромкой.

Режущим инструментом станка является тонкое (толщиной 0,1—0,15 мм) металлическое кольцо, на кромку отверстия которого нанесены алмазные зерна размером 40—60 мкм.

Инструмент крепят винтами на конце шпинделя вращающегося с частотой 3—5 тыс. об/мин, к барабану (рис.1.2) с помощью колец, имеющих сферический выступ на одном и соответствующую впадину на другом, чем обеспечивается необходимый предварительный натяг диска. Окончательное натяжение диска обеспечивается при установке его на барабан /. Стягивающими винтами 7 уменьшают зазор между буртиком 2 барабана 1 и зажимными

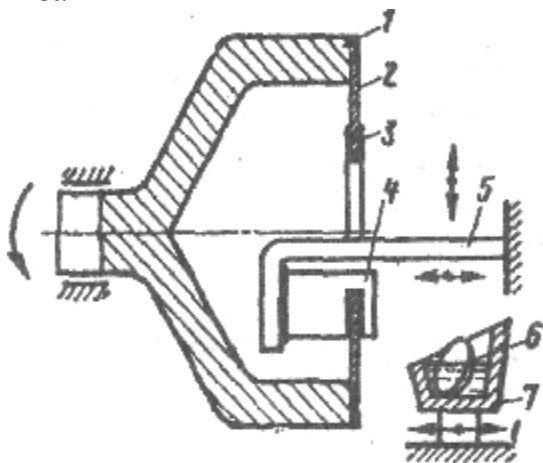


Рисунок 1.1 – Схема резки диском с внутренней кромкой

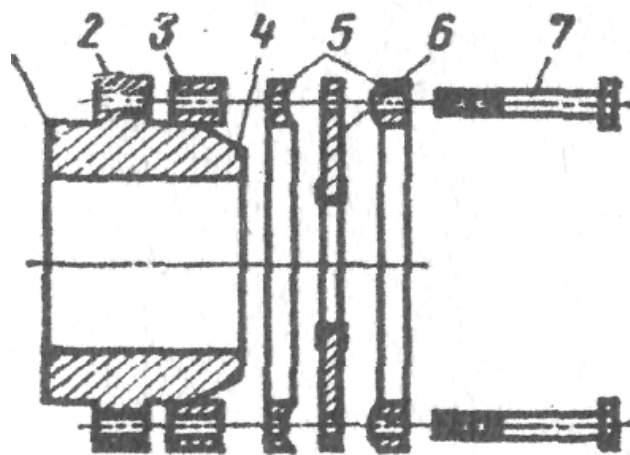


Рисунок 1.2 – Барабан для закрепления алмазного диска

кольцами 5. Режущий диск 6 при этом упирается в опорный выступ 4 барабана и растягивается в радиальном направлении. Между зажимными кольцами и буртиком барабана устанавливают регулирующие прокладки 3, которые ограничивают перемещение колец 5 и предохраняют диск от разрыва из-за чрезмерного натяжения. Равномерного натяжения диска достигают последовательным постепенным затягиванием диаметрально расположенных винтов 7. На некоторых моделях машин, например «Алмаз-БМ», натяг диска обеспечивается закачкой жидкости (например глицерина) в полость между зажимными кольцами.

Все виды конструктивных компоновок выпускаемых в настоящее время станков для резки слитков полупроводниковых материалов можно разделить на три группы:

- с горизонтальным расположением шпинделя и суппортом, осуществляющим как дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины, так и подачу резания (рис. 1.3, а);

- с вертикальным расположением шпинделя и суппортом, также осуществляющим и дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины, и подачу резания (рис. 1.3, б);

- с горизонтальным расположением шпинделя, осуществляющим подачу резания за счет качания его вокруг некоторой оси, и суппортом, осуществляющим только дискретное перемещение слитка на толщину отрезаемой пластины (рис. 1.3, в).

Станки первого типа, к которым относятся модели 2405, «Алмаз-4», Т5-21 и Т5-23, появились в промышленности раньше других и являются наиболее распространенными. При такой компоновке горизонтально расположенный шпиндель вращается в подшипниках относительно малого диаметра, что позволяет сравнительно легко обеспечить необходимую частоту вращения, прецизионность и виброустойчивость узла. Недостатком такого типа компоновки станков является достаточно интенсивный износ направляющих суппорта и, как следствие этого, — потеря точности.

Для обеспечения необходимых геометрических размеров отрезанных полупроводниковых пластин, их плоскопараллельности и соответствия заданным размерам, а также уменьшения глубины нарушенного слоя пластины подвергаются шлифованию и полированию. Процесс шлифования представляет собой обработку пластин на твердых доводочных дисках — шлифовальниках (из чугуна, стекла, латуни и т. д.) абразивными микропорошками зернистостью от 28 до 3 мкм или алмазными шлифовальными кругами с зернистостью от 120 до 5 мкм. Погрешности формы пластин (неплоскостность, клиновидность и т. д.), возникшие в процессе резки слитка, исправляют в процессе шлифования. В результате шлифования получают пластины правильной геометрической формы с шероховатостью поверхности $H_a 0,32—0$,

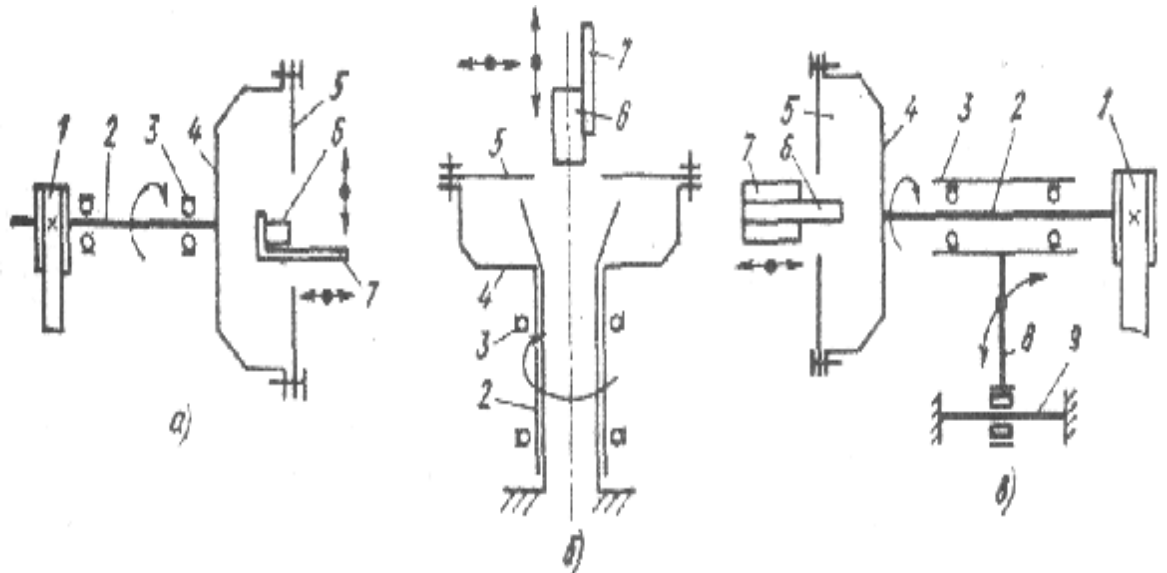


Рисунок 1.3 – Схемы конструктивных компоновок станков для резки слитков алмазными кругами с внутренней режущей кромкой:

1 – клиноременная передача; 2 – вал шпинделя; 3 – подшипник; 4 – барабан; 5 – алмазный диск; 6 – слиток; 7 – державка; 8 – поворотный рычаг; 9 - ось

Станок для шлифования СПШ-1 на одной станине имеет две позиции обработки с независимыми друг от друга парами шпинделей. Частота вращения верхних шпинделей с абразивными кругами 2400 об/мин, а шлифовальных столиков с закрепленными на них обрабатываемыми пластинами — 350 об/мин. Обычно на одной позиции производится предварительное шлифование, а на другой — чистовое. Подача круга осуществляется за счет массы шпинделя

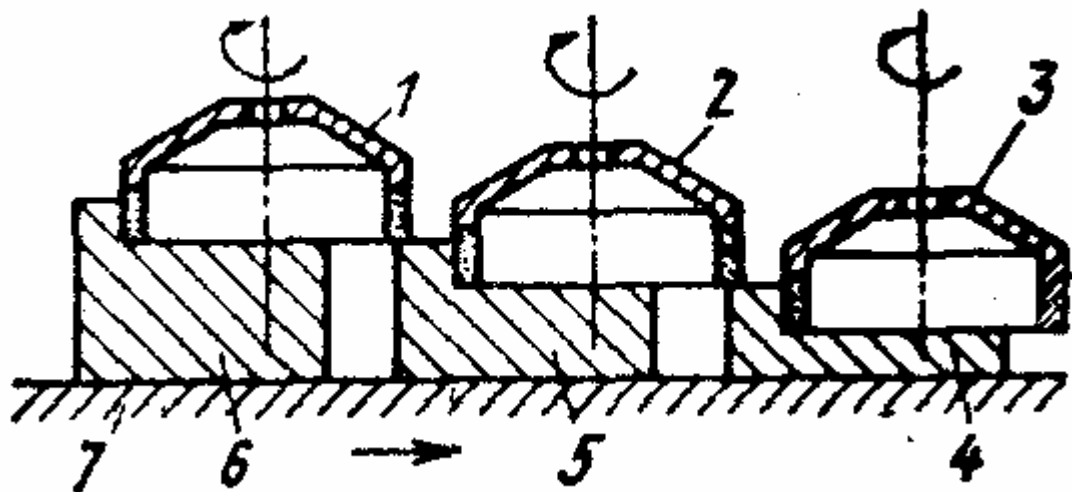


Рисунок 1.4 - Схема врезного шлифования:

1 -3 - шлифовальные круги; 4-6 - обрабатываемые пластины; 7 - стол.

На рис.1.4 представлена схема врезного шлифования.

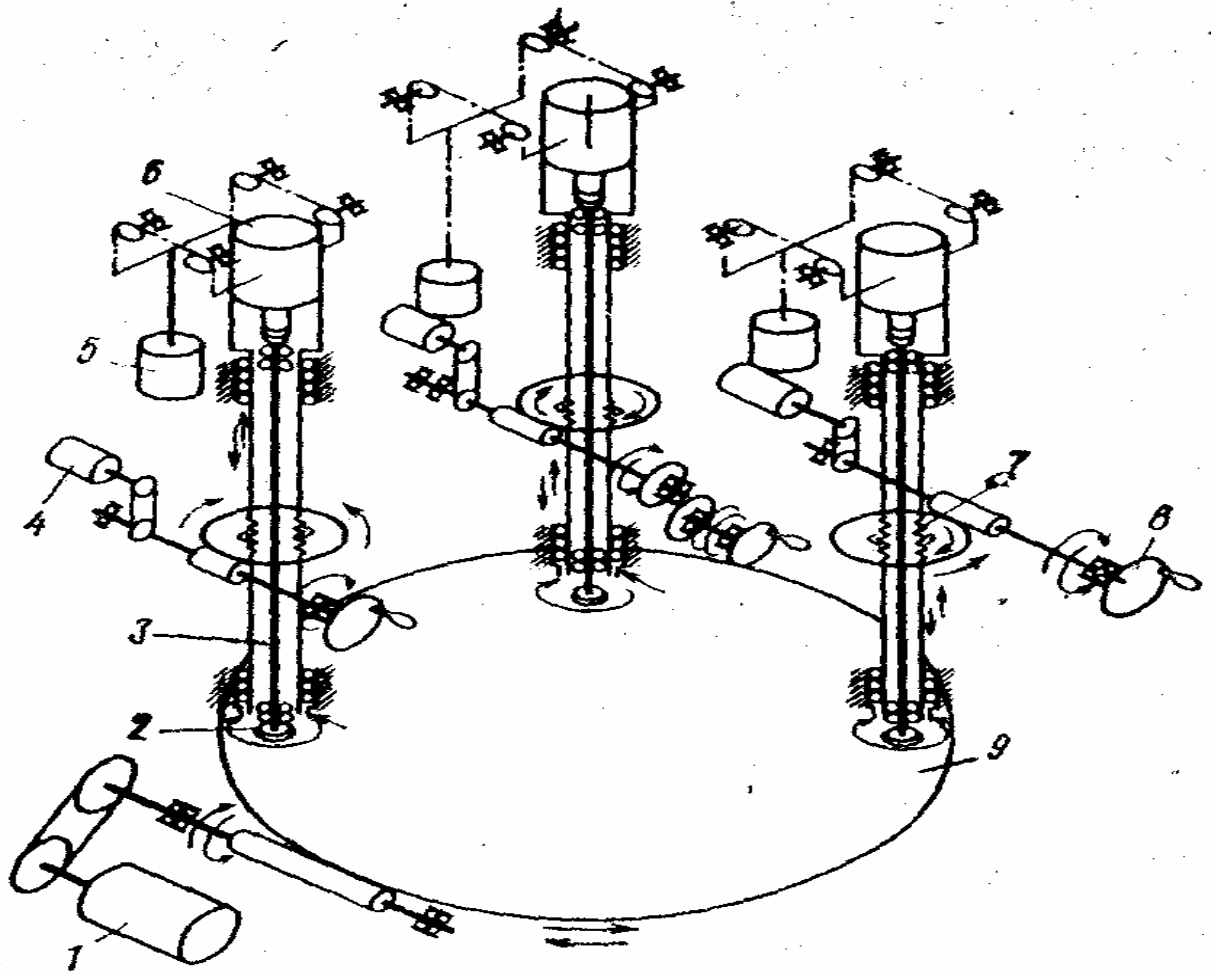


Рисунок 1.5 - Кинематическая схема станка САШ-420М

Станки для одностороннего шлифования связанным абразивом, работающие по схеме врезного шлифования, нашли широкое применение для сошлифовывания слоев большой толщины. Станки типов САШ-3, САШ-420М предназначены для шлифования пластин диаметром до 60 мм, а САШ-150 — диаметром до 150 мм. Все они имеют аналогичные конструктивные схемы. В верхней части массивной литой станины смонтированы по три шпинделя, вращающихся с частотами $9 \cdot 10^3$ — $14 \cdot 10^3$ об/мин. В нижней части находится стол с вакуумными присосками для обрабатываемых пластин, вращающийся с частотой 0,5—5 об/мин.

Кинематическая схема станка типа САШ-420М показана на рис.1.5. Стол 9 приводится во вращение электродвигателем постоянного тока через клиноременную передачу и червячную пару. Шпиндели 3 вращаются от электрошпинделей 6 через центробежную муфту. Питание электрошпинделей осуществляется от генераторов высокой частоты. Шпиндельный узел уравновешен противовесом 5.

Для полирования пластин могут быть использованы те же станки, что и для шлифования. Для этого на шлифовальниках делают выборки и с помощью внешних и внутренних стальных колец 4 на них натягивают замшу. Для подачи абразивной суспензии в зону полирования в верхнем шлифовальнике и в замше имеются отверстия. К станкам, которые можно использовать как для шлифования, так и для полирования пластин, относятся станки СПШП-1, В1МЗ 105, ЖК14.09М, СДП-100.

Полирование может быть:

механическим, которое происходит главным образом за счет микрорезания зернами абразива, пластических деформаций и сглаживания;

химико-механическим, при котором снятие материала с обрабатываемой поверхности происходит в основном за счет механического удаления образующихся в результате химических реакций мягких пленок. Для химико-механического полирования необходимо несколько большее усилие прижима обрабатываемого изделия к полировальнику, чем при механическом. Поэтому для этих процессов создан ряд специальных станков, например, моделей СХМП-1, Ю1МЗ. 105.004, Ю1М 1.244.000.

Схема полуавтомата одностороннего полирования полупроводниковых пластин типа Ю1М 1.244.000 показана на рис.1.6. Стол 4, на котором размещен съемный полировальник 8, приводится во вращение с частотой 87 ± 10 об/мин от электродвигателя 7 через клиноременную передачу 6 и двухступенчатый редуктор 5.

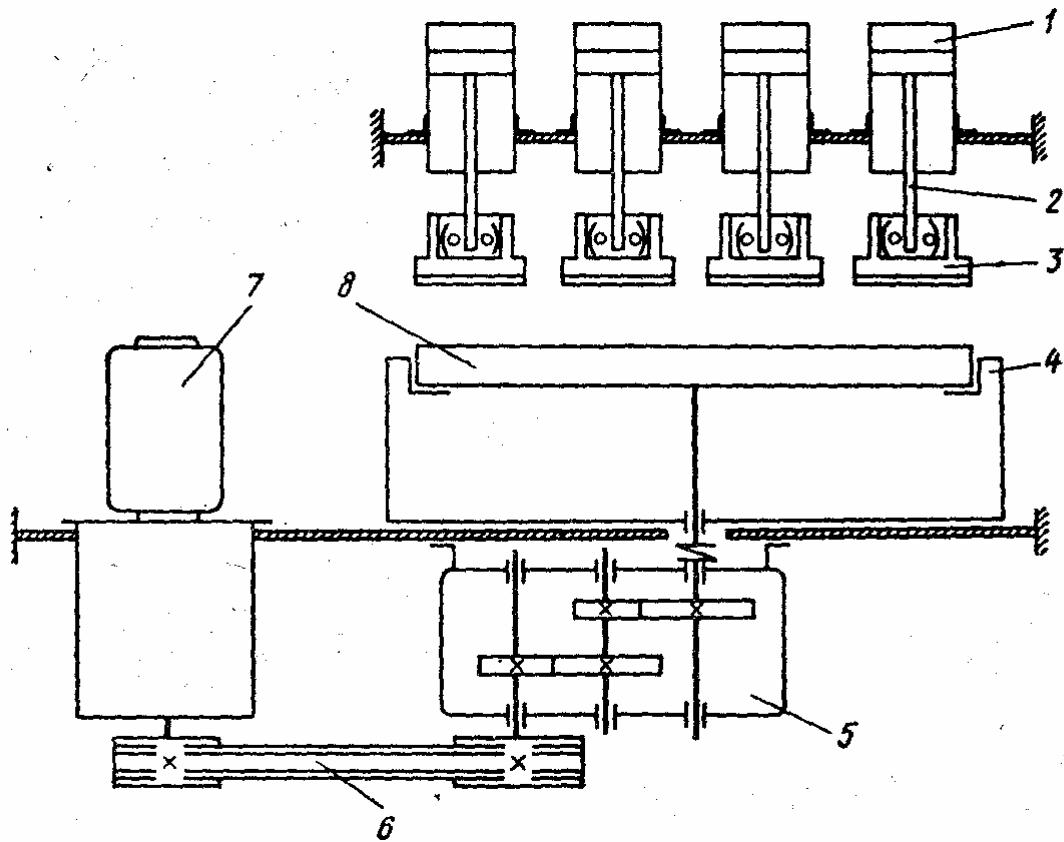


Рисунок 1.6 - Схема полуавтомата одностороннего полирования пластин.

На верхней части станины станка размещены четыре пневмоцилиндра, на штоках 2 которых шарнирно закреплены прижимные диски 3. Пневмоцилиндры осуществляют подъем, опускание и необходимый прижим пластин к полировальнику. Шарнирное крепление прижимных дисков с приклеенными к ним пластинами позволяет им плотно прилегать (самоустанавливаться) к полировальнику и вращаться вокруг собственных осей, обеспечивая сложное движение полируемых пластин. Станок позволяет обрабатывать пластины диаметром до 100 мм и обеспечивает получение шероховатости обработанной поверхности по четырнадцатому классу.

После механической обработки кристаллическая решетка на поверхности полупроводниковых пластин разрушается, появляются трещины и риски в материале и различные загрязнения. Для удаления нарушенного поверхностного слоя полупроводникового материала применяют химическое травление, протекающее при контакте подложки с жидкой или газообразной средой.

Процесс химического травления — это химическая реакция жидкого травителя с материалом пластины с образованием растворимого соединения и последующим его удалением. В технологии полупроводникового производства обычно химическую обработку называют травлением, а химико-динамическую — полирующим травлением. Химическое травление полупроводниковых материалов проводят для того, чтобы удалить нарушенный слой. Оно характеризуется повышенной скоростью травления в местах нарушения кристаллической структуры. При химико-динамическом травлении удаляют более тонкие слои, т. к. его назначение — создать на пластине гладкую поверхность высокого класса чистоты. Состав травителя подбирают так, чтобы полностью подавить его способность к селективному травлению. Процессы химической обработки сильно зависят от температуры, концентрации и чистоты реактивов. Поэтому при проектировании оборудования для химической обработки стремятся стабилизировать основные параметры процесса и этим гарантировать высокое качество травления.

Материалы, применяемые для изготовления рабочих камер, должны быть стойкими к используемым реактивам, а применяемые средства автоматизации — либо малочувствительными (например, пневмо- или гидроавтоматика), либо хорошо защищенными от воздействия паров агрессивных реактивов (в случае применения электроавтоматики).

Установка для химического травления пластин типа ПВХО-ГК60-1 показана на рис. 1.7, а схема устройства рабочих органов приведена на рис. 1.8.

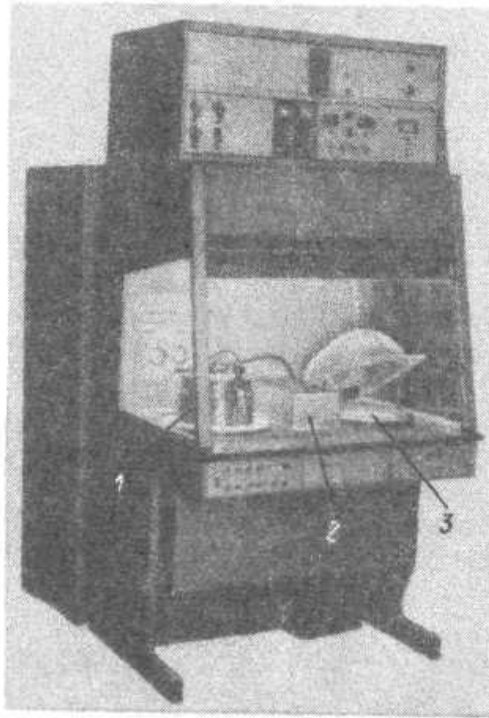


Рисунок 1.7- Установка для химического травления пластин типа ПВХО-ГК60-1:

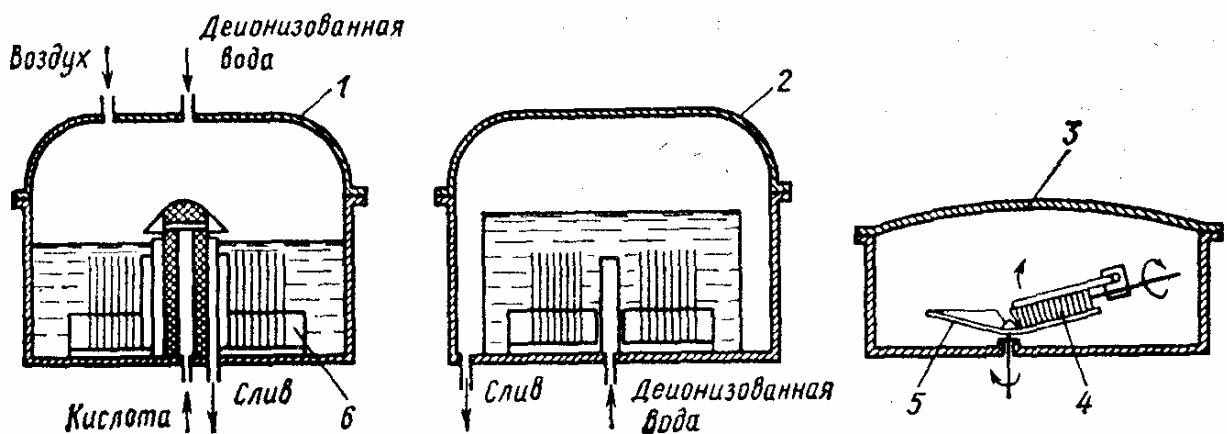


Рисунок 1.8 - Схема рабочих органов установки ПВХО-ГК60-1

На рабочем столе в пылезащитной камере смонтированы три рабочих ванны 1—3. В ванне производится обработка кремниевых пластин погружением в холодные или горячие кислоты, или органические растворители. Крышка ванны в процессе обработки герметически закрыта. Обработка производится групповым методом в кассетах по 40—60 пластин в зависимости от их размеров. Из ванны кассеты 6 переносятся в ванну 2 для отмывки деионизованной водой. Степень отмывки контролируется прибором по разности сопротивления деионизованной воды на входе и выходе ванны. После этого в ванне 3 пластины по 10 шт. обрабатываются кистями 4 и сушатся на центрифуге 5.

Химико-динамическое, или полирующее травление производится с помощью устройства, схема которого приведена на рис.1.9. Сущность его заключается в активном перемешивании травителя непосредственно у поверхности обрабатываемой пластины. Благодаря этому обеспечивается быстрое удаление продуктов реакции, равномерное поступление новых порций травителя, неизменность его состава и постоянство теплового режима обработки.

Во фторопластовый барабан 2, вращающийся на оси, наклоненной относительно нормали на угол $15\text{--}45^\circ$, заливают порцию травителя 3. Обрабатываемые пластины 4 наклеивают на фторопластовые диски 5, которые помещают на дно барабана пластинами вверх. Барабан приводится во вращение от электродвигателя через редуктор с частотой вращения 120 об/мин. При этом диски 5 перекачиваются по его стенке, обеспечивая хорошее перемешивание травителя и создавая условия для равномерного травления.

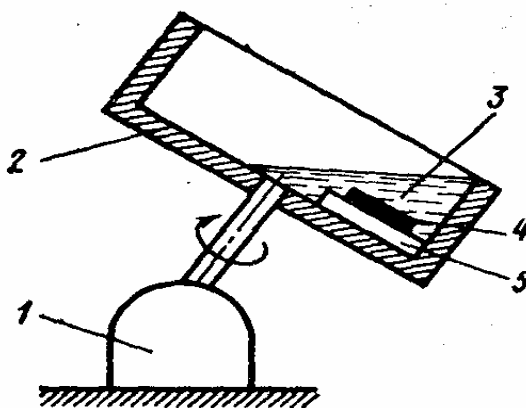


Рисунок 1.9 - Схема установки полирующего травления.

Для полирования кремния применяют также электрохимическое полирование, в основе которого лежит анодное окисление полупроводника, сопровождаемое механическими воздействиями на окисную пленку. Принципиальная схема установки показана на рис. 66. Два дисковых электрода — анодный 2 и катодный 3 отделены друг от друга капроновой сеткой, натянутой с помощью кольца на катод 3. Сетка пропитана электролитом, постоянно подаваемым из бачка 1. Для изменения скорости протекания электролита угол отклонения катодного диска от вертикали может регулироваться от 0 до 20° . Электродвигатель 5 постоянного тока

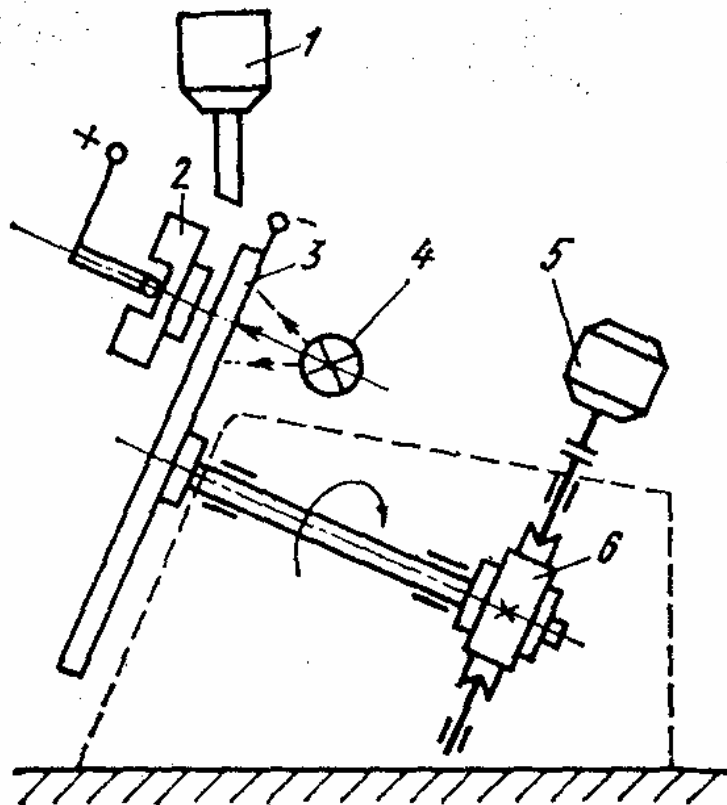


Рисунок 1.10 - Схема установки электрохимической полировки полупроводниковых пластин.

и редуктор 6 позволяют плавно изменять частоту вращения катодного диска 3 в пределах 80—200 об/мин. Катодный диск изготовлен из коррозионно-стойкой стали и имеет радиальные пазы, через которые пластины n-типа подсвечиваются мощной лампой 4 для генерации неосновных носителей (дырок), необходимых для протекания реакции. Анодный диск 2 с наклеенной на нем пластиной в процессе работы самоустанавливается по катодному диску. Данный метод обработки особенно эффективен при локальном травлении кремния.

Качество поверхности обработанных пластин определяется шероховатостью и глубиной нарушенного слоя. После резки, шлифовки и полировки пластины отмывают. Состояние поверхности пластин контролируют визуально или под микроскопом. При этом проверяют наличие на поверхности царапин, рисок, сколов, загрязнений и следов воздействия химически активных веществ.

Во всех установках контроль осуществляется оператором с использованием, например, микроскопов типов МБС-1, МБС-2 (с увеличением 88^{\times}) или МИМ-7 (с увеличением 1440^{\times}). Микроскоп МБС-1 благодаря специальному устройству осветителя позволяет наблюдать поверхность в лучах света, падающих под разными углами. На микроскопе МИМ-7 можно наблюдать поверхность в светлом и темном полях. Оба микроскопа позволяют измерять размеры повреждения поверхности специально установленными окулярами. В установках для визуального контроля пластин автоматизируется подача пластин из кассеты на

предметный столик под микроскоп и возвращение ее после контроля в соответствующую классификационную кассету. Иногда вместо оптического микроскопа применяют проекторы, позволяющие снизить утомляемость оператора.

Шероховатость поверхности в соответствии с ГОСТ 2789—73 оценивают средним арифметическим отклонением профиля Ra или высотой микронеровностей Rz . ГОСТ устанавливает 14 классов шероховатости поверхности. Для 6—12 классов шероховатости основной является шкала Ra , а для 1—5-го и 13—14-го — шкала Rz . Шероховатость измеряют в визуально определенном направлении, соответствующем наибольшим значениям Ra и Rz .

Для измерений используют стандартные профилографы-профилометры или с помощью сравнительного микроскопа поверхность обработанной пластины визуально сравнивают с эталоном. Современный профилограф-профилометр — универсальный высокочувствительный электромеханический ощупывающий прибор, предназначенный для измерения волнистости и шероховатости металлических и неметаллических поверхностей. Принцип действия прибора состоит в том, что колебательные движения ощупывающей иглы с радиусом закругления 10 мкм вызывают изменения напряжения, которые регистрируются отсчетным устройством. Прибор имеет также записывающий механизм и может выдавать профилограмму поверхности. Для бесконтактного измерения применяют микроинтерферометры МИИ-4 и МИИ-11 с пределами измерений Rz —0,005—1 мкм.

Толщина слоя, в котором в результате механической обработки нарушена кристаллическая решетка полупроводника, является одним из критериев качества обработанной поверхности пластины. Толщина нарушенного слоя зависит от размера зерна абразивного порошка, примененного для обработки, и приближенно может быть определена по формуле:

$$H=K \cdot \delta, \quad (1.1)$$

где δ — размер зерна; K — эмпирический коэффициент ($K=1$ для Si; $K=2,2$ для Ge).

Структура нарушенного слоя имеет зоны нарушенного рельефного и трещиноватого слоев (последняя самая большая) и зону упругих деформаций. Под ними расположен неповрежденный монокристаллический материал.

Толщину нарушенного слоя определяют только в процессе отладки технологии механической обработки пластин. Наиболее простым и удобным методом определения толщины нарушенного слоя является визуальный контроль под микроскопом поверхности после селективного травления. Существуют и другие методы.

После определения толщины нарушенного слоя и назначения припусков на обработку стремятся создать и поддерживать такой технологический процесс изготовления полупроводниковых пластин,

который гарантировал бы удаление дефектов, возникающих при механической обработке. Поэтому в установившемся производственном процессе толщину нарушенного слоя не контролируют.

Для контроля толщины, неплоскостности, непараллельности и прогиба пластин используют стандартные измерительные средства, такие, как индикаторы часового типа или другие аналогичные им рычажно-механические приборы с ценой деления 0,001 мм. В последнее время для контроля геометрических параметров пластин все чаще начинают применять бесконтактные пневматические или емкостные датчики. С их помощью можно быстро производить измерения, не подвергая пластину риску загрязнения или механического повреждения.

Оборудование для очистки поверхностей полупроводниковых подложек

В производстве полупроводниковых ИС важное место занимает очистка поверхности подложек как на начальных этапах формирования структуры, так и межоперационная обработка. Так как атомы полупроводника, расположенные на поверхности имеют много ненасыщенных (оборванных) связей, это объясняет высокие адсорбционные свойства и химическую активность поверхности.



Рисунок 2.1- Виды загрязнений в микроэлектронике



Рисунок 2.2 – классификация методов очистки
Жидкостная очистка включает в себя три стадии очистки:

обезжиривание, травление и отмывку.

Обезжиривание — растворение, разрушение и удаление с поверхности загрязнений химически не связанных с материалом подложки.

Применяются горячие или кипящие бензин, бензол, толуол, спирты, CCl_4 , дихлораты. Эти жидкости легко воспламеняются, ядовиты, поэтому для проведения процессов используются герметичные камеры с вытяжной вентиляцией.

Травление — растворение загрязнений, образующихся в результате химического взаимодействия материала подложки с окружающей средой. При этом происходит удаление загрязнений и поверхностного слоя подложки.

Травители включают в себя окислитель и растворитель, в качестве которых применяются кислоты и щелочи (HF, HNO_3 , уксусная кислота, $NaOH, KOH$).

Отмывка — растворение в деионизованной воде остатков реагентов. Используется вода марки А с $\rho_v=7-20$ МОм·см и марки Б с $\rho_v=1$ МОм·см. Отмывку производят до выравнивания сопротивления воды на входе и выходе. Контроль чистоты поверхности можно осуществлять по значению краевого угла смачивания (рис.2.3). Угол должен составлять менее 75° .

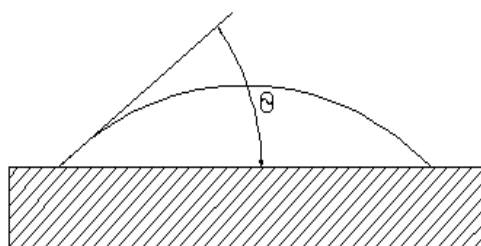


Рисунок 2.3- Определение чистоты поверхности

2.1 Оборудование для жидкостной очистки

Структурная схема любой технологической установки очистки состоит из следующих частей или узлов:

- Рабочая камера или реактор;
- Рабочий инструмент или устройство;
- Устройства интенсификации очистки;
- Приводные устройства, обеспечивающие необходимые механические перемещения подложек, рабочего инструмента или реагента или других элементов;
- Пылезащитная камера;
- Система подготовки и подачи реагентов;
- Блоки питания и управления (датчики контроля и управления);

Установки бывают периодического и непрерывного действия. Преимущество установок непрерывного действия (рис.2.4) заключается в

снижении эксплуатационных расходов, затрат времени (цикловые потери на загрузку и выгрузку), повышении устойчивости технологических параметров.

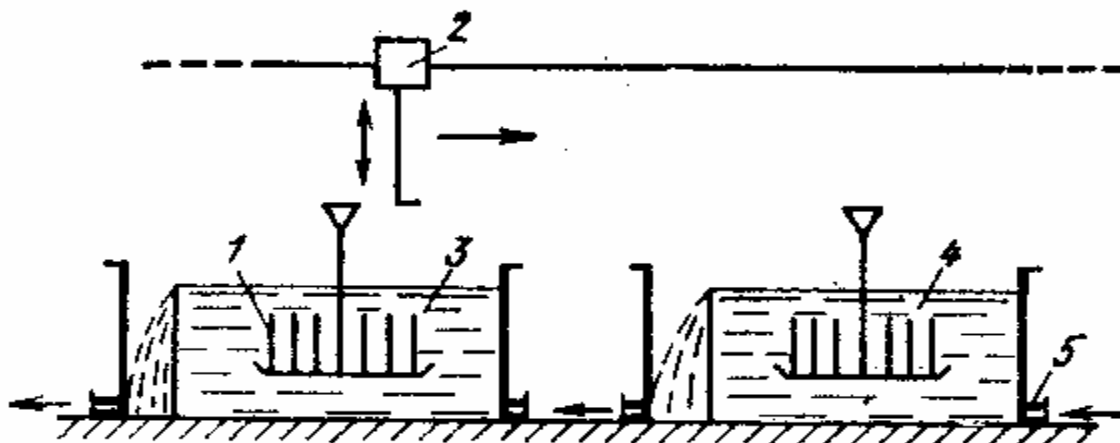


Рисунок 2.4 – Схема установки непрерывного действия

1 – кассета с подложками; 2- устройство для перемещения кассет;
3,4 – ванны; 5 – патрубок для слива реагента;

Ванна изготавливается из фторопласта. Реагент подается насосами через фильтровально – регенерационную систему.

2.2 Способы интенсификации очистки

Цель -увеличение скорости и качества очистки. Осуществляются путем нарева и перемешивания реагента, применением ультразвуковых колебаний. Нагрев осуществляется спиралями из нихрома, ТЭНами, лампами ИК - нагрева.

Мешалки бывают лопастными, пропеллерными и турбинными.

УЗ – излучатели включают в себя пьезоэлектрические и магнитострикционные преобразователи. В качестве материалов для пьезоэлектрических преобразователей используют ВаTiO₃, цирконат – титанат – свинца (ЦТС). Можно изготавливать любой формы – преимущества. Недостатки – большие механические и диэлектрические потери – перегрев (max 90 °С). P=100-300 Вт/см². U= 100-300 В.

Магнитострикционные излучатели бывают двух типов: стержневые и плоские (рис.2.5).

Стержневые излучатели выполняют из стандартных никелевых трубок. При работе трубка сильно нагревается вихревыми токами, поэтому ее разрезают по образующей.

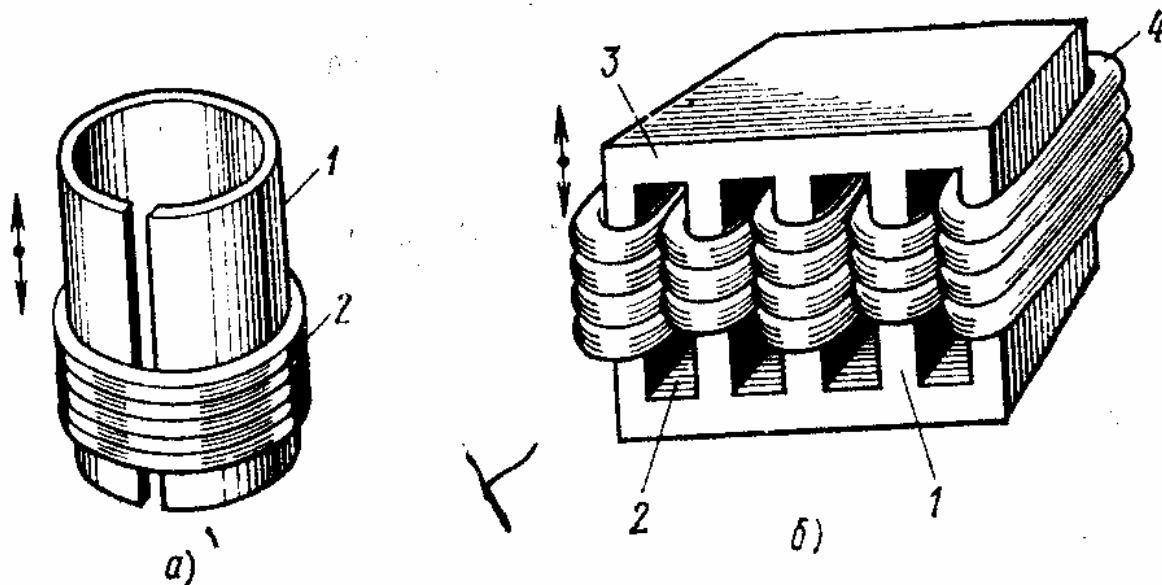


Рисунок 2.5 – Конструкции УЗ-излучателей: а) стержневой, б) плоский
1-трубка; стержень; 2,4- обмотка, окно; 3-ядро

Более просты и надежны плоские излучатели. Они представляют собой пакеты из листов железа, никеля, кобальта и их сплавов. $P=0.4 - 0.5 \text{ Вт/см}^2$, $f=22; 44; 400 \text{ кГц}$.

2.3 Установки периодического действия

Несмотря на достоинство непрерывных процессов, в промышленности широко используют оборудование периодического действия. Преимуществами являются большая гибкость, меньшие капитальные затраты.

Широкое применение для очистки нашли вращающиеся столы или центрифуги с размещенными на них пластинами, обрабатываемых при помощи щеток и форсунок, распыляющих реагентов. Приводы вращения бывают с электродвигателем постоянного тока, с сельсином, электродвигатель переменного тока, с редуктором, с гидродвигателем, с пневмотурбиной. Конструкции узлов крепления пластин на столе центрифуги осуществляется вакуумными присосами, штырями, прижимами.

2.4 Вакуумно-плазменное травление

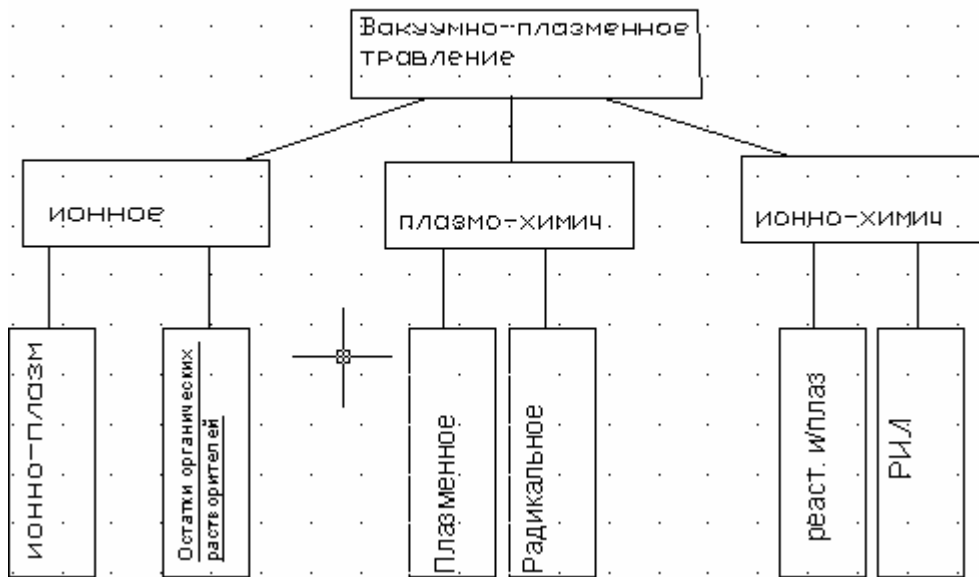


Рисунок 2.6 – Разновидности вакуумно-плазменного травления

Преимущества: точность ± 0.003 мм, универсальность, нет отходов.

Недостатки: $E=1-10$ кэВ, $j=10$ А/м²

Источники: диодные и автономные ионные источники.

Подается постоянное или переменное (ВЧ – 13.56 МГц) напряжение.

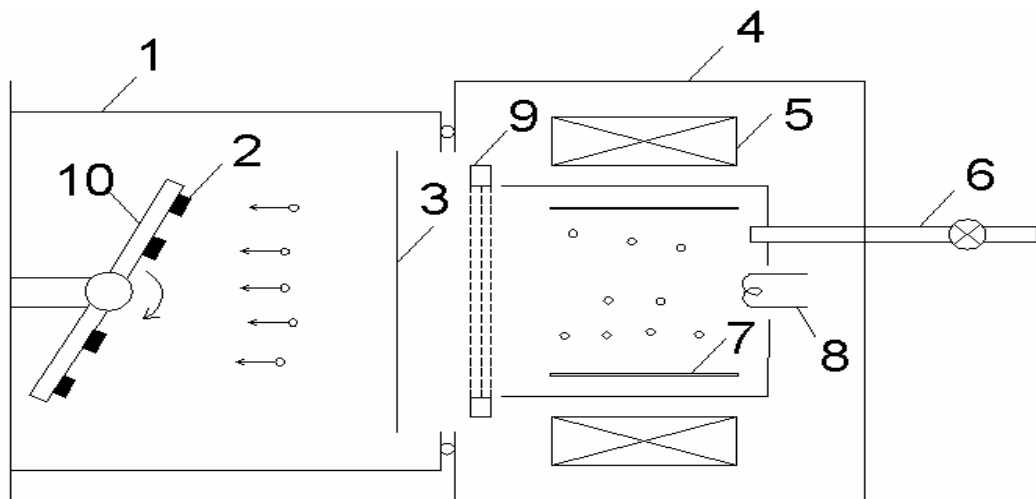


Рисунок 2.7 – Установка плазмохимического травления с автономным ионным и источником

1-вакуумная камера, 2-подложки, 3- нейтрализатор, 4- газоразрядный и/источник, 5-соленоид, 6- натекатель, 7- анод, 8- катод, 9- сетки, 10- подложкодержатель

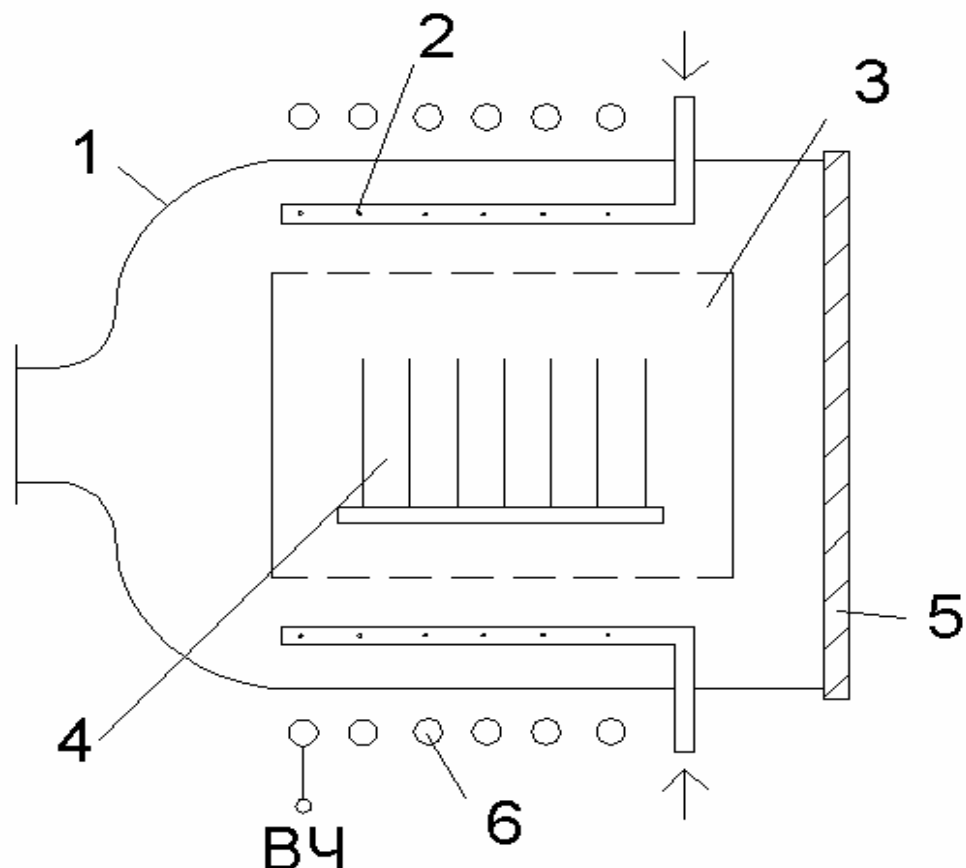


Рисунок 2.8 – Установка плазмохимического травления с объемным расположением подложек в реакторе

1 – кварцевый реактор; 2-коллектор для подачи газа; 3 – металлический перфорированный корпус; 4 – подложки; 5 – крышка ;6 – индуктор;
7 – огкачной патрубков

2.5 Газовое травление

Используют в эпитаксиальных установках для очистки подложек. Сущность газового травления заключается в химическом взаимодействии материала подложки при температуре $T=800-1000^{\circ}\text{C}$.с газообразными реагентами и образовании при этом легкоудаляемых летучих соединений.

Газовым травлением получают более чистые поверхности по сравнению с жидкостным травлением.

Реакторы и газовые системы такого оборудования необходимо выполнять из химически стойких и термостойких материалов. Реакторы должны быть герметичными и не иметь застойных зон, т.к. многие газы токсичны и взрывоопасны.

Системы нагрева в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

3.1 Требования к системам нагрева

- отсутствие загрязнений подложек материалом нагревателя;
- минимальная инерция при переходе от одного температурного режима к другому;
- воспроизводимость и точность поддержания температуры по всей длине технологической зоны;
- максимальный срок службы;
- простота обслуживания.

Наиболее распространенными в полупроводниковом производстве видами нагрева являются индукционный, резистивный и лучистый нагрев.

3.2 Индукционный нагрев

Индукционный нагрев (ИН) – прогрессивный способ, обладающий быстротой, равномерностью и высокой стабильностью нагрева.

ИН основан на выделении тепла в результате возникновения вихревых токов и магнитного гистерезиса (для ферромагнетиков), при помещении материалов в переменное магнитное поле.

Выделяющееся количество тепла пропорционально квадрату тока на данном участке проводника:

$$Q=I^2R\tau, \tag{3.1}$$

где R – сопротивление проводника, τ - время нагрева

Т.к. внутри материала создается внутреннее магнитное поле, что приводит к тому, что э.д.с. и плотность тока убывают от поверхности к центру.

Таблица 3.1 - Генераторы для ИН

Вид генератора	P, кВт	КПД, %	Диапазон частот, кГц
Электромагнитный	5-3000	70-80	$2 \times 10^1 - 10^4$
Ионный	100-1000	85-90	$5 \times 10^2 - 3 \times 10^3$
Тиристорный	1-50	80-95	$100 - 10^4$
Искровой	1-5	20-40	$10^3 - 10^6$
Ламповый	1-500	50-65	$5 \times 10^4 - 10^6$

Конструктивно устройство для индукционного нагрева представляет собой кварцевую трубу вокруг которой намотан многovitковый индуктор из медной трубки. Через последнюю пропускается вода для охлаждения. Исходный материал помещается в кварцевую трубу с защитной атмосферой.

Индукционный нагрев позволяет получить максимальную удельную мощность до $5 \cdot 10^7$ Вт/м².

3.3 Резистивный нагрев

Нагрев за счёт прохождения через объект электрического тока по закону Джоуля-Ленца.

Используют постоянный и переменный токи. Постоянный ток экономически невыгоден из-за отсутствия источников большой мощности.

В качестве материала нагревателей применяют сплавы на основе Fe, Ni, Cr и Al. В виде проволоки или ленты. Также используют нагреватели из графита.

Преимущества резистивного нагрева: высокий КПД, простота, и низкая стоимость.

Недостатки: загрязнение материалом нагревателя, старение нагревателя.

3.4-Лучистый нагрев. ИК - нагрев

Этот метод высокой эффективностью, надёжностью, универсальностью и нашёл чрезвычайно широкое применение в том числе и при производстве ИЭТ.

Преимущества ИК – нагрева:

- низкая инерционность;
- стабильность режима нагрева;
- высокая удельная мощность (до 400 кВт/м²);
- возможность локального нагрева (1-1,5 мм²);
- высокая селективность;
- высокая прецизионность;
- высокая чистота процесса;
- возможность автоматизации и контроля.

ИК - излучение является частью оптического (э/магнитного) излучения и занимает диапазон от 0,76 до 1000 мкм.

Источники ИК – излучения делятся на светлые и тёмные, либо на резистивные и газоразрядные. Для резистивных источников используются:

1) сплав ОХ27Ю5А, температура нагрева 1300°С, $\lambda_{\max} = 1,83$ мкм, наработка на отказ 2000-7000 ч;

2) силитовые стержни, температура нагрева 1400°С, $\lambda_{\max} = 1,72$ мкм, наработка на отказ 1500-2000 ч;

3) стержни из MoSi₂, температура нагрева 1650°С, $\lambda_{\max} = 1,54$ мкм, наработка на отказ 1500-2000 ч;

4) кварцевые галогенные лампы, температура нагрева 3000°C , $\lambda_{\text{max}} = 1,1$ мкм, наработка на отказ 1500-2000 ч, мощность 0,05-20 кВт.

В качестве газоразрядных источников используются дуговые лампы (температура нагрева 6000°C , $\lambda_{\text{max}} = 0,6$ мкм, время наработки на отказ 10мин – десятки часов, мощность 15-20 кВт) и ксеноновые лампы (температура нагрева 6000°C , $\lambda_{\text{max}} = 0,6$ мкм, наработка на отказ 300-2000 ч, мощность 0,8-20 кВт).

Кварцевые галогенные лампы накаливания (ГЛН) являются наиболее перспективными ИК – излучателями, т.к. конструктивные и эксплуатационные качества этих ламп в десятки раз лучше, чем у излучателей других типов.

Впервые предложены в 1959 г. в ЮАР. В основу работы кварцевой галогенной лампы положен т.н. регенеративный галогенный цикл (рис.3.1):



где X – атом галогена (J, Br, Cl).

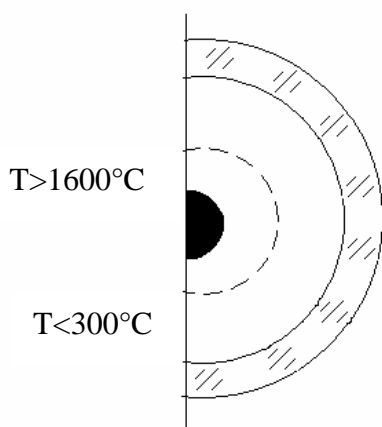


Рисунок 3.1 – Сечение ГЛН

Термодинамическое равновесие реакции может сдвигаться или вправо или влево. При $T > 300^{\circ}\text{C}$ и $T < 1200^{\circ}\text{C}$ йод соединяется с W, осевшим на стенке. Это соединение при $T > 250-300^{\circ}\text{C}$ переходит в газообразное состояние. Диффундируя и попадая в зону накала молекулы диссоциируют на W I₂. Частицы W осаждаются на нити накала, а высвободившиеся атомы I₂ диффундируют в зону с более низкой температурой и на стенках колбы соединяются с W и т.д.

Температура нити составляет 2800°C , длина волны излучения $\lambda_{\text{max}} = 1$ мкм, время наработки на отказ до 5000 ч.

Для эффективной работы ламп применяются цилиндрические, параболические, эллиптические и горизонтальные рефлекторы. Поверхность рефлекторов покрывается слоем меди, серебра, алюминия или золота. Охлаждение колб ламп осуществляется водой или струей воздуха.

3.5 - Оборудование для быстрого термического отжига (БТО).

Преимущества БТО:

- индивидуальная обработка пластин;
- широкий диапазон термического цикла;
- высокая скорость нагрева ($30-300^{\circ}\text{C}/\text{с}$);
- широкий диапазон рабочих температур ($200-2000^{\circ}\text{C}$);

- высокая чистота процесса – реактор с «холодной» стенкой;
- воспроизводимость и равномерность обработки;
- малые габариты, вес, потребляемая мощность, стоимость;
- высокая производительность.

Применение БТО:

- эпитаксия;
- отжиг после ИИ;
- формирование мелких р-п-переходов;
- получение силицидов, оксидов, нитридов;
- выжигание омических контактов;
- оплавление стекла БСС, ФСС для СБИС и УБИС.

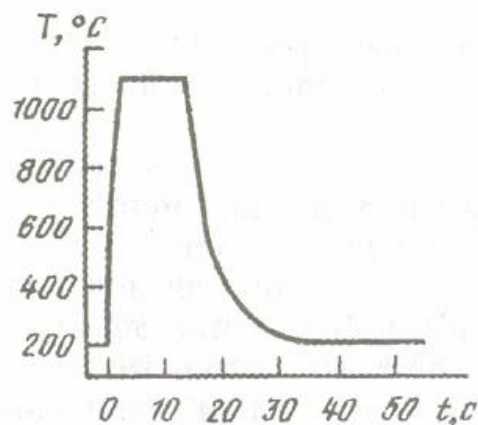


Рисунок 3.2 - Типовая температурная характеристика для установок БТО

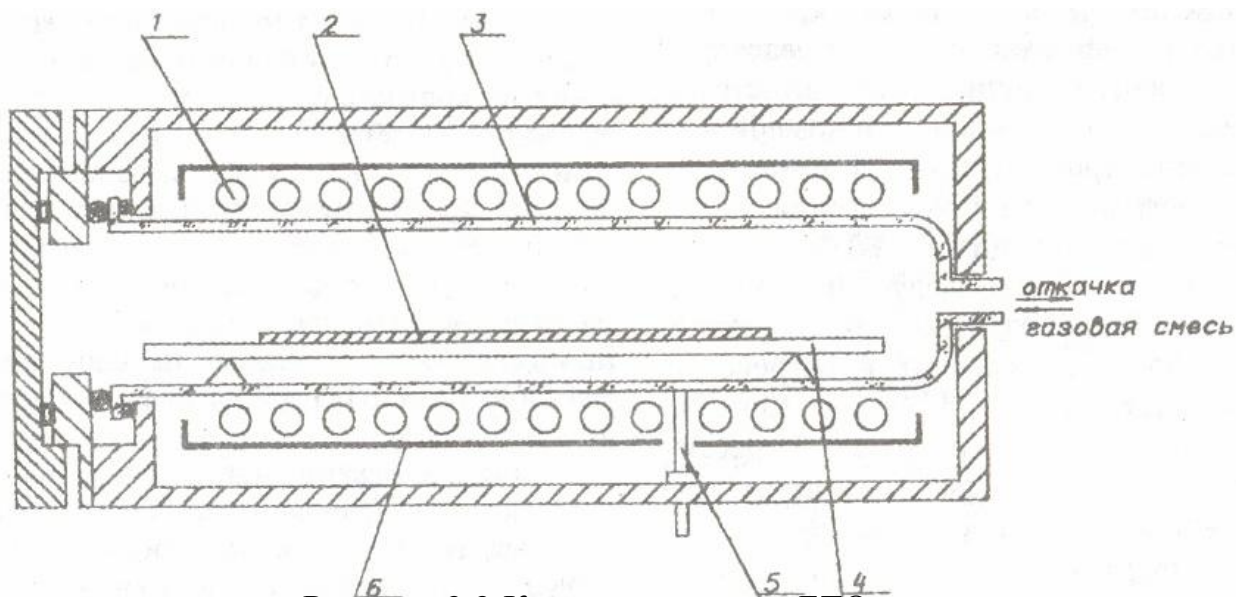


Рисунок 3.3-Кварцевая камера БТО:

- 1 –вольфрамовые галогеновые лампы; 2 – полупроводниковая пластина;
3 – кварцевая труба; 4 – кварцевый поддон; 5 – пирометр; 6 – отражатель.

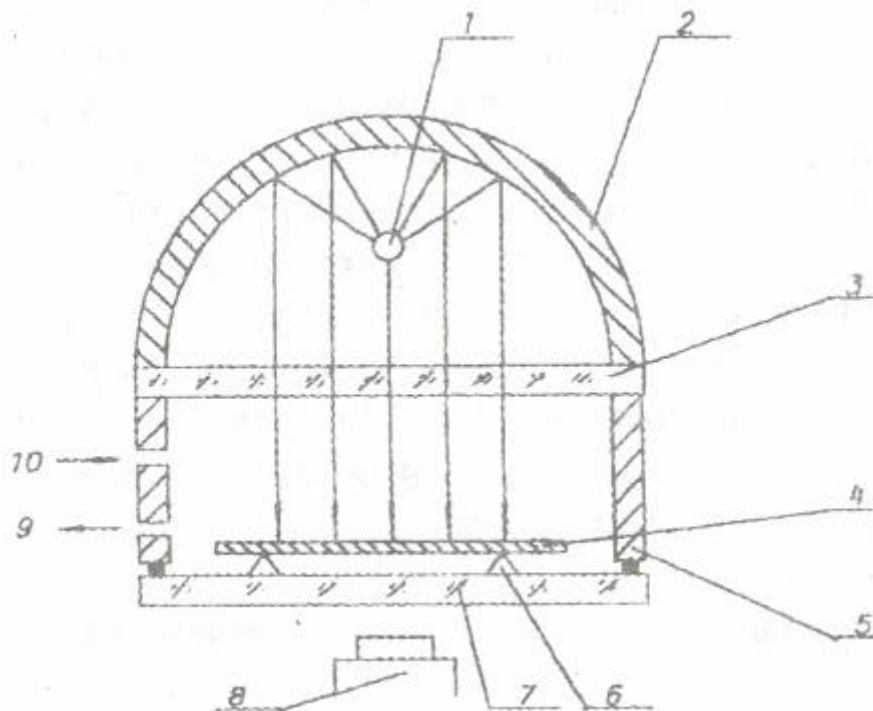


Рисунок 3.4. - Металлическая камера БТО:

1 – дуговая лампа; 2 – рефлектор; 3 – кварцевое окно; 4 – пластина;
 5 – камера; 6 – опорные кварцевые штыри; 7 – окно из флюорида кальция;
 8 – ИК-прожектор; 9 – откачка; 10 – ввод газов.

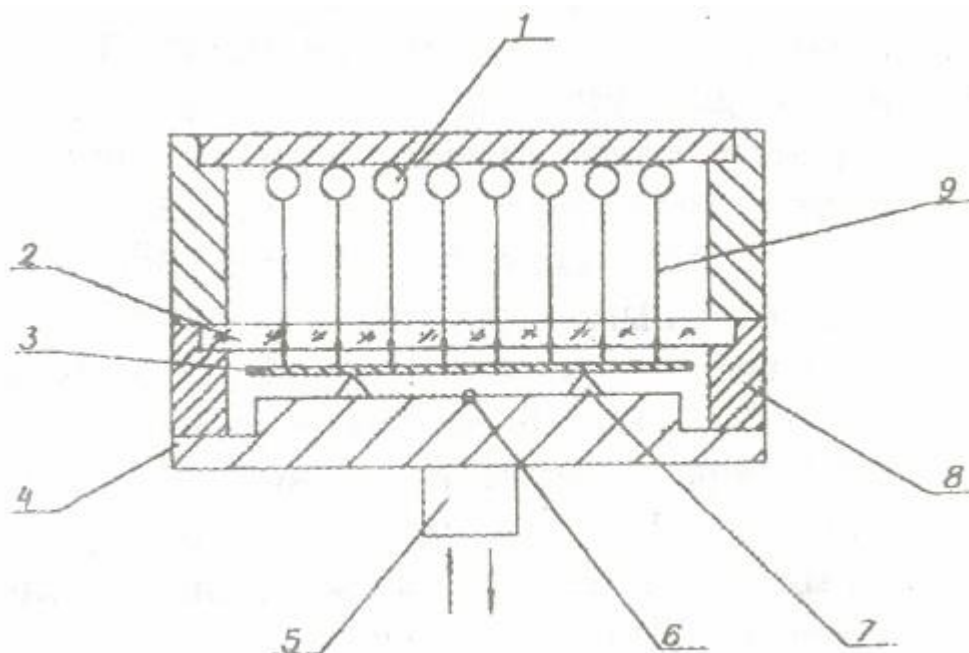


Рисунок 3.5 - Охлаждаемая камера БТО:

1 – вольфрамовые лампы; 2 – кварцевое окно; 3 – полупроводниковая пластина; 4 – водоохлаждаемое основание; 5 – механизм загрузки; 6 – ИК-термометр; 7 – опорные штыри; 8 – водоохлаждаемая камера; ИК-излучение.

Газовые системы в производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Газовые системы (ГС) в технологическом оборудовании для производства изделий микроэлектроники выполняют следующие функции: очистка, смешение, увлажнение, распределение, транспортирование, измерение и регулировка параметров газов и парогазовых смесей, а также утилизацию и нейтрализацию выводимых из реактора продуктов реакций.

Требования к газовым системам:

- герметичность;
- материалы ГС не должны вносить загрязнений и должны быть химически стойки;
- отсутствие непродуваемых участков и застойных зон;
- минимальные гидравлические сопротивления;
- высокая точность измерения и регулирования расходов газа;
- безопасные условия эксплуатации и наличие защиты при аварийных ситуациях.
-

Виды газов, применяемых в микроэлектронном производстве

Таблица 4.1 - Газы и соединения, применяемые в промышленности

Наименование	Химическая формула	Источник	Назначение
Водород	H ₂	Магистраль	ТС
Азот	N ₂	Магистраль	ТС, ВС
Кислород	O ₂	Магистраль	ТС
Аргон	Ar	Магистраль	ТС, ВС
Водяной пар	H ₂ O	Увлажнитель	ТС
Тетрахлорид кремния	SiCl ₄	Испаритель	ТС
Моносилан	SiH ₄	Баллон	ТС
Тетраэтооксисилан (ТЭОС)	Si(OC ₂ H ₅) ₄	Испаритель	ТС
Фосфин	PH ₃	Баллон	ТС
Пятиокись фосфора	P ₂ O ₅	Электродпечь	ТС
Трихлорид фосфора	PCl ₃	Испаритель	ТС

Диборан	B_2H_6	Баллон	ТС
Оксид бора	B_2O_3	Электропечь	ТС
Арсин	AsH_3	Баллон	ТС
Трихлорид мышьяка	$AsCl_3$	Испаритель	ТС
Трехокись мышьяка	As_2O_3	Электропечь	ТС
Хлористый водород	HCl	Баллон	ТС
Двуокись углерода	CO_2	Баллон	ТС
Метан	CH_4	Баллон	ТС
Фреон	CF_4	Баллон	ТС

ТС – технологические среды, ВС – вспомогательные среды

Аппаратура и элементы ГС

1. Дозаторы

Служат для приготовления парогазовых смесей (ПГС). Существуют следующие виды дозаторов - барботажные, испарительные, объемные.

Барботажные дозаторы

В них ПГС образуется при пропускании газа-носителя через жидкий слой испаряемого вещества. Количество испаряемого вещества зависит от его уровня, температуры, степени измельчения пузырьков и расхода газа носителя.

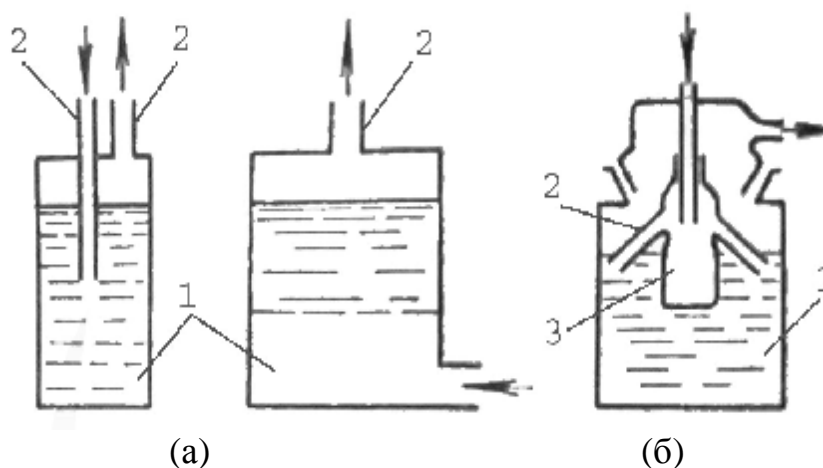


Рисунок 4.1 – Барботажные дозаторы; а – простые, б – с поплавком; 1 – реагент, 2 – трубки, 3 – поплавок

Недостатки барботажных дозаторов:

- образование тумана испаряемой жидкости и конденсация на стенках трубопроводов, попадание капельной фазы в реактор, что может быть причиной брака;
- укрупнение пузырьков и соединения их в газовый шнур.

Испарительные дозаторы

В таких дозаторах ПГС образуется при прохождении газа-носителя над поверхностью жидкости.

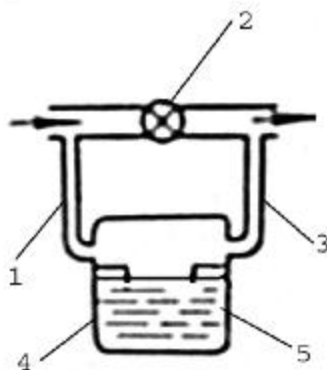


Рисунок 4.2 – Испарительный дозатор с жиклером
1,3 – входная и выходная трубка; 2 – жиклер; 4 – корпус; 5 – реакгент

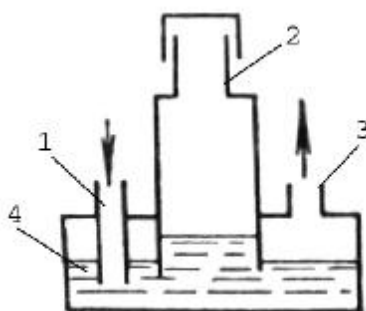


Рисунок 4.3 – Коаксиальный дозатор
1,3 – входная и выходная трубка; 2 – коаксиальный сосуд; 4 – реакгент

Достоинство дозатора с жиклером - постоянная концентрация парогазовой смеси, а достоинство коаксиального дозатора - постоянный уровень жидкости.

Объемные дозаторы

Работают на принципе полного испарения реактента, имеющего постоянную скорость истечения из отверстия малого диаметра.

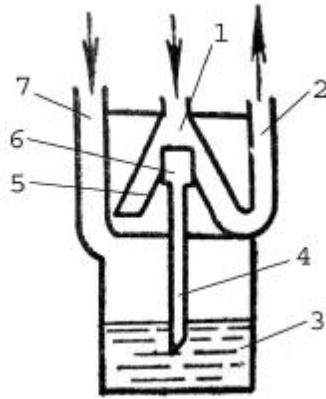


Рисунок 4.4 – Дозатор с газовым подпором

1,2 – входные и выходные трубки; 3 – реагент; 4 – трубка; 5 – конус со спиральной канавкой; 7 – напорный трубопровод

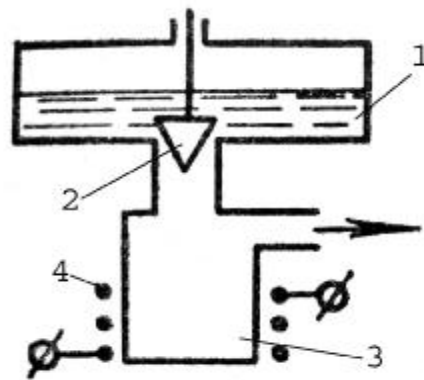
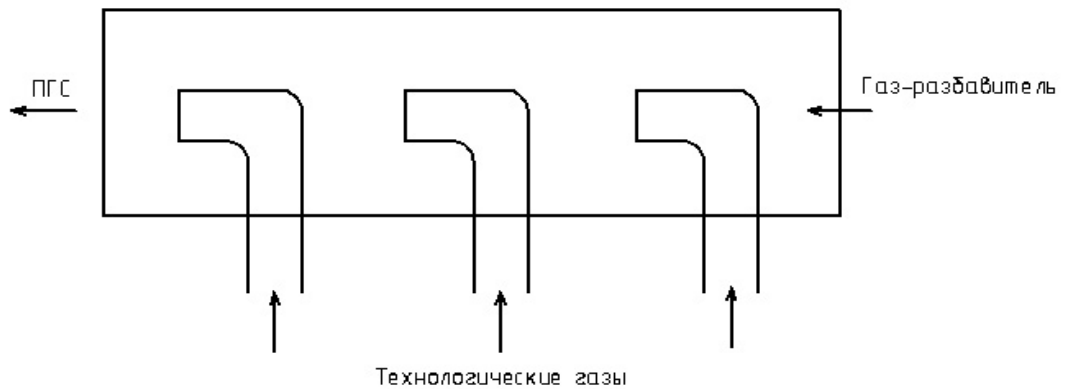


Рисунок 4.5 – Капельный дозатор

1 – резервуар с реагентом; 2 – клапан; 3 – камера испарения; 4 – ВЧ-индуктор.

2. Смесители

Применяются для смешения и гомогенизации ПГС. Наибольшее применение получили струйные смесители.



а)

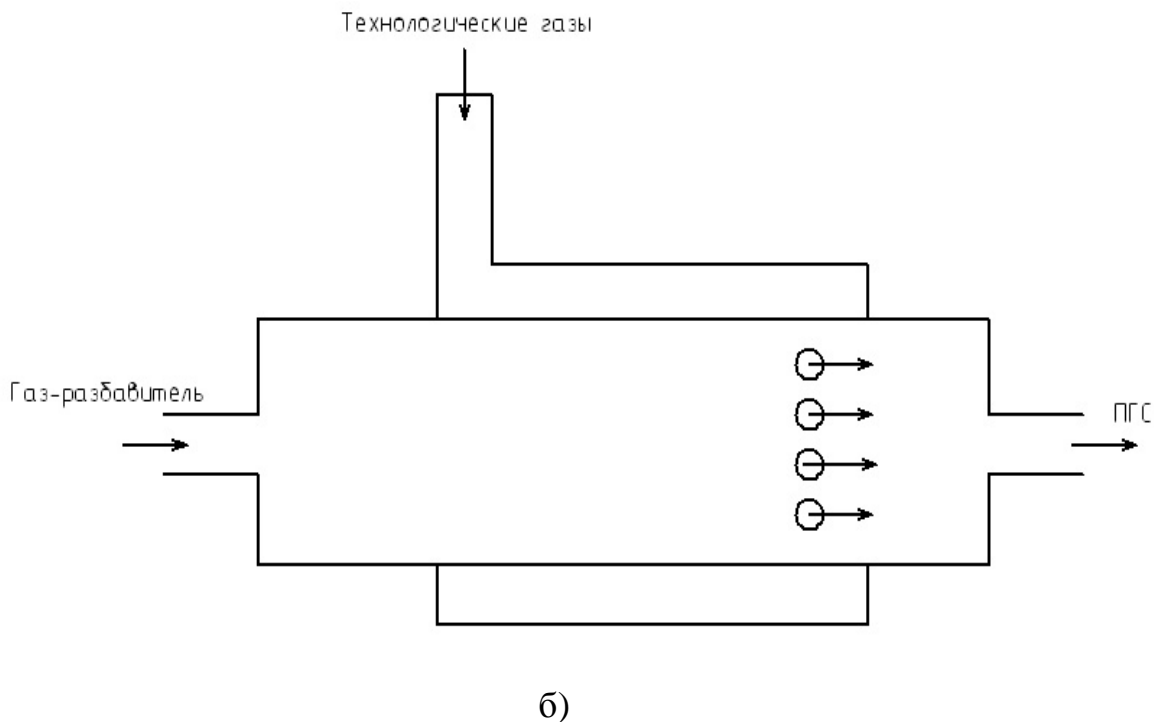


Рисунок 4.6 – Конструкции смесителей: а) с соплами ввода примесей; б) с камерой ввода примесей

3. Увлажнители

Источниками водяного пара служат устройства, называемые «водяными банями», в которых происходит испарение воды высокой чистоты.

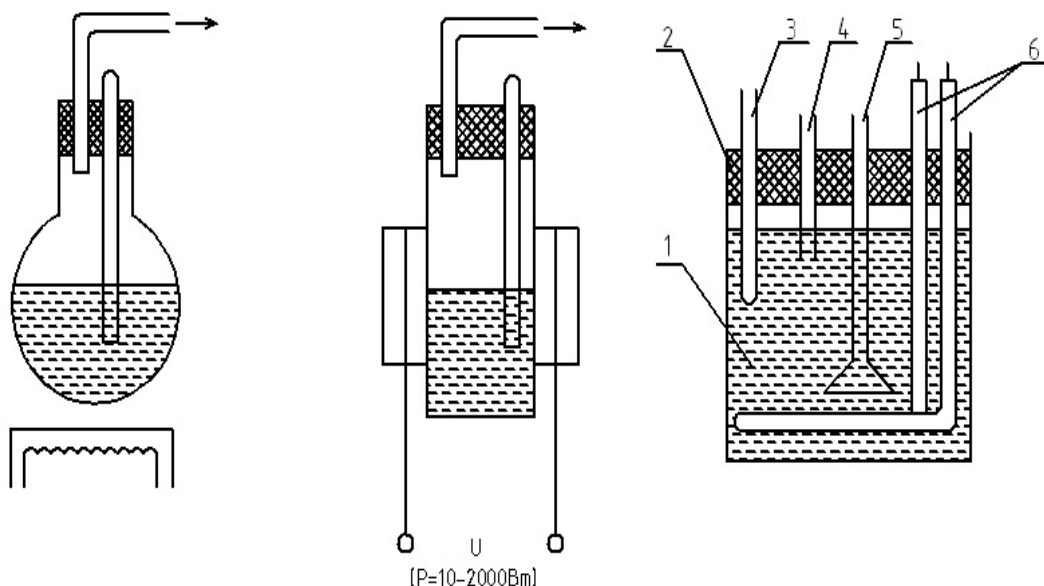


Рисунок 4.7 – Конструкции испарителей
 1 – сосуд; 2 – уплотнитель; 3 – термометр сопротивления; 4 – выход газа-носителя; 5 – распределитель; 6 – натекатель.

4. Запорно-регулирующая арматура

К запорно-регулирующей арматуре относятся клапаны, вентили, натекатели, регуляторы расхода газов.

Клапаны бывают ручные, пневматические, электромагнитные.

Натекатели: игольчатые (ручные, с электрическим приводом), электромагнитные, пьезоэлектрические, тепловые.

Приборы для измерения расхода газов

Для измерения расхода газов используют приборы, называемые ротаметрами (расходомеры обтекания), либо тепловые расходомеры.

Трубопроводы

Для изготовления трубопроводов для ГС используют коррозионно-стойкие стали, фторопласт, полиэтилен, кварц. Выбор диаметра трубопровода зависит от скорости протекания газов (15 – 25 м/с). Применяются также прогреваемые трубопроводы.

Другие элементы ГС

К другим элементам ГС относятся манометры, фильтры очистки, реле давления, обратные клапаны, регуляторы давления, газовые датчики.

Основы вакуумной техники

5.1 Методы измерения вакуума

Область давлений, используемая в современной вакуумной технике, $10^5 \dots 10^{-12}$ Па. Измерение давлений в таком широком диапазоне не может быть обеспечено одним прибором. В практике измерения давления разреженных газов применяются различные типы преобразователей, отличающиеся по принципу действия и классу точности.

Приборы для измерения общих давлений в вакуумной технике называют *вакуумметрами*. Они обычно состоят из двух частей: манометрического преобразователя и измерительной установки. По методу измерения вакуумметры могут быть разделены на *абсолютные* и *относительные*. Показания абсолютных приборов не зависят от рода газа и могут быть заранее рассчитаны. В приборах для относительных измерений используют зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от давления. Вакуумметры измеряют общее давление газов, присутствующих в вакуумной системе.



Рис. 6.1. Диапазон рабочих давлений вакуумметров

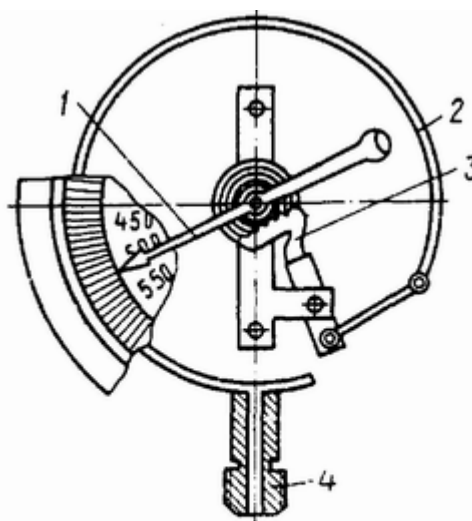


Рис. 6.2. Деформационный трубчатый преобразователь (трубка Бурдона)

На рис. 6.1 показаны диапазоны рабочих давлений различных типов вакуумметров.

Деформационные преобразователи

К деформационным преобразователям относятся трубчатые и мембранные преобразователи.

Трубка Бурдона (рис. 6.2) — деформационный манометр в виде спиральной трубки 2, скручивающейся под действием атмосферного давления в случае откачки внутренней полости за счет разных радиусов кривизны, а, следовательно, и площадей наружной и внутренней поверхностей трубки. Силы F_1 и F_2 , действующие соответственно на поверхности с большим и меньшим радиусами:

$$F_1 = (p_{\text{атм}} - p)A_1; \quad F_2 = (p_{\text{атм}} - p)A_2, \quad (5.1)$$

где $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление; p — давление в трубке; A_1 и A_2 — площади наружной и внутренней поверхностей участка спиральной трубки.

Измерительное уравнение связывает между собой перемещение конца трубки x и разность давлений $p_{\text{атм}} - p$ соотношением

$$\Delta F = F_1 - F_2 = (p_{\text{атм}} - p)(A_1 - A_2) = cx, \quad (5.2)$$

где c — жесткость трубки.

Манометр измеряет давления в пределах $10^5 \dots 10^3$ Па. Измерение давлений ниже 10^3 Па затруднено тем, что трубка при малой жесткости должна быть достаточно прочной, чтобы выдержать атмосферное давление. Погрешность измерения равна 5% и ограничена упругим последствием трубки — медленным возвращением трубки в исходное положение после упругой деформации.

К вакуумной системе манометр подключается через штуцер 4. Регистрация перемещения спиральной трубки обычно рычажно-стрелочная, когда конец спиральной трубки связан через зубчатый сектор 3 со стрелкой 1. Деформационные мембранные преобразователи различаются в зависимости от способа регистрации перемещения мембраны и метода измерения. В барометрах используется схема, показанная на рис. 6.3,а. Внутри герметичной полости, образованной мембранами 1, создается сравнительное давление $p_{\text{ср}}$.

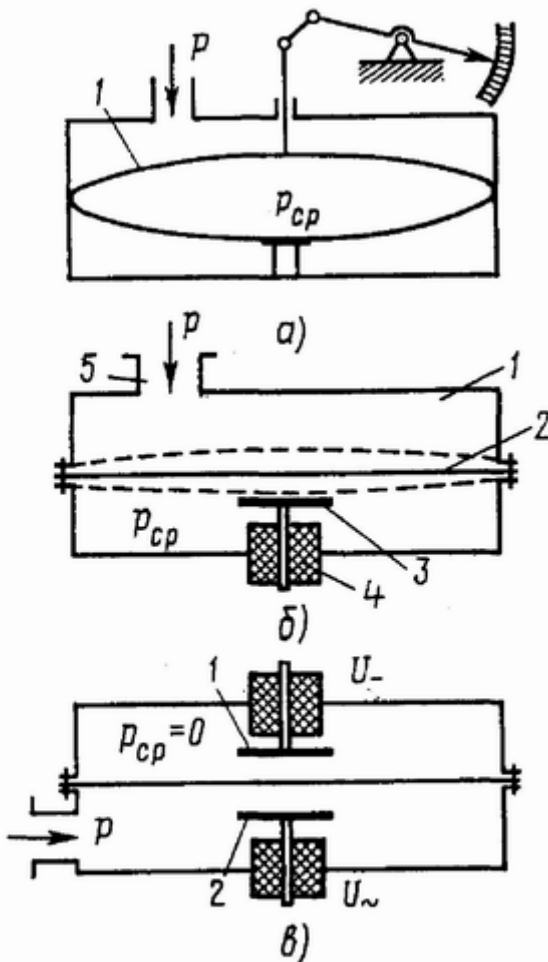


Рис. 6.3. Деформационные мембранные преобразователи

Если измеряемое давление p не равно $p_{\text{ср}}$, то происходит деформация мембран и перемещение стрелки, пропорциональное разности давлений:

$$(p_{cp} - p) = kx, \quad (5.3)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Такой прибор измеряет разность давлений и поэтому называется *дифференциальным*.

На этом же принципе работает мембранный преобразователь (рис. 6.3, б), но в нем применен емкостный метод регистрации перемещения. Мембрана 2 в этом приборе герметично разделяет корпус 1 на две камеры, в одной из которых поддерживается сравнительное давление p_{cp} , а другая присоединяется патрубком 5 к вакуумной системе. Через изолятор 4 в нижнюю камеру вводится электрод 3, образующий с мембраной конденсатор, емкость которого является функцией давления. Этот преобразователь может измерять абсолютное давление в вакуумной системе, если $p_{cp} = 0$.

Мембранный преобразователь с двумя электродами (рис. 6.3, в) работает при нулевой деформации мембраны. На электрод 2 подается переменное напряжение, позволяющее определить емкость и положение мембраны. На электрод 1 прикладывается постоянное напряжение, которое за счет электростатических сил возвращает мембрану к исходному положению, компенсируя воздействие разности давлений. Разность давлений в этом приборе пропорциональна квадрату постоянного напряжения, приложенного к электроду 1.

Диапазон измерения мембранных преобразователей $10^5 \dots 10^{-1}$ Па. Но так как линейность показаний сохраняется только при небольших деформациях мембраны, то один прибор может измерять давления, лежащие в пределах 2...3 порядков.

Нижний предел измерения ограничивается температурными деформациями, минимальной жесткостью и прочностью мембраны. Преобразователи с электростатической компенсацией деформации мембраны имеют более стабильные характеристики.

Гидростатические преобразователи

Простейшими гидростатическими преобразователями являются жидкостные манометры с открытым и закрытым коленом. Измеряемая этими манометрами разность давлений p и p_{cp} уравнивается весом столба жидкости высотой h :

$$(p_{cp} - p) = g\rho h, \quad (5.3)$$

где g — ускорение земного притяжения; ρ — плотность жидкости.

Манометры с открытым коленом (рис. 6.4, а) удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. В этом случае $p_{cp} = p_{атм}$ и высота столба h минимальна. Показания такого манометра зависят от атмосферного давления.

В манометре с закрытым коленом (рис. 6.4, б) перед заполнением рабочей жидкостью получают давление $p_{cp} \approx 0$, что позволяет непосредственно измерять абсолютное давление газа в вакуумной системе. В этом случае показания прибора не зависят от атмосферного давления. При измерении малых давлений (менее $2 \cdot 10^4$ Па) манометр с закрытым коленом имеет меньшие габариты, чем манометр с открытым коленом.

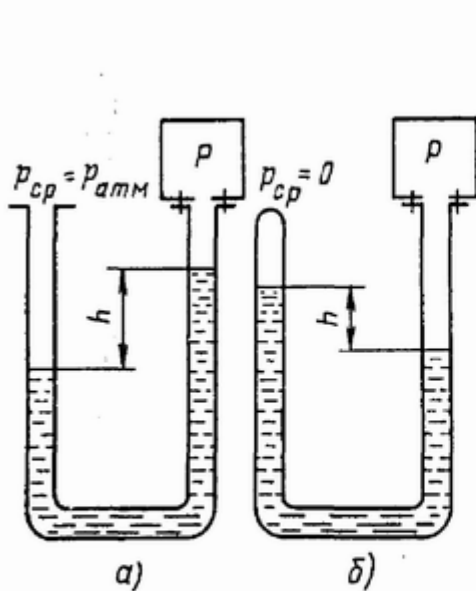


Рис. 6.4. Жидкостные манометры:
а — с открытым коленом; б — с закрытым коленом

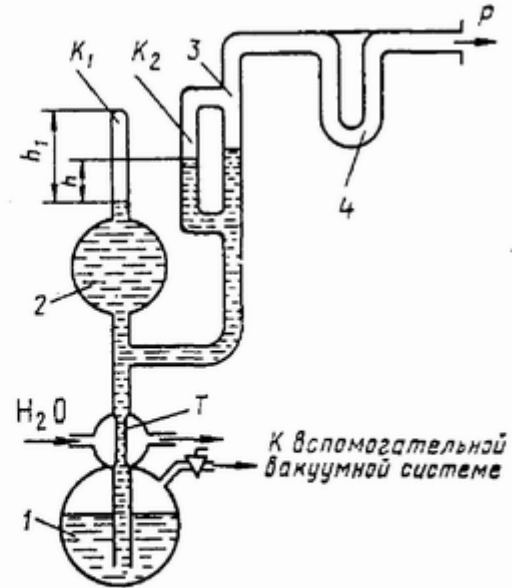


Рис. 6.5. Компрессионный манометр

В качестве жидкости применяют ртуть и масло. Масляные манометры имеют большую чувствительность, так как плотность масла примерно в 15 раз меньше плотности ртути. Однако масло хорошо растворяет газы, и перед работой требуется его тщательное обезгаживание.

Пределы измерения ртутных манометров $10^5 \dots 10^3$ Па, а масляных — $10^5 \dots 10^0$ Па. Погрешность при отсчете уровня h может быть доведена до 0,1 мм. Более точное измерение уровня не имеет смысла из-за непостоянства величины поверхностного натяжения, колебаний плотности, температурных градиентов рабочей жидкости и т. д.

Чувствительность манометров к перепаду давлений в основном ограничивается вязкостью самой жидкости.

Гидростатические манометры с предварительным сжатием газа называются *компрессионными*. Компрессионный манометр (рис. 6.5) состоит из измерительного баллона 2 с капилляром K_1 , резервуара с ртутью, соединительного трубопровода 3 с капилляром K_2 . Через азотную ловушку 4 манометр подключается к вакуумной системе. Баллон 2 перед началом измерений соединяется с вакуумной системой через трубку 3. Из баллона 1 под давлением атмосферного воздуха ртуть поднимается вверх по трубке T , отключает баллон 2 от вакуумной системы и сжимает заключенный в баллоне газ до давления, которое можно непосредственно измерить по разности уровней ртути в закрытом и сравнительном капиллярах K_1 и K_2 . После компрессии давление измеряется точно так же, как и в обычном ртутном манометре с закрытым коленом. Диапазон измерения

компрессионных манометров $10^1 \dots 10^3$ Па. Трудности в измерении более низких давлений связаны с непостоянством капиллярной депрессии ртути (понижение уровня ртути в капилляре по сравнению с ее уровнем в сообщающемся с капилляром широким сосуде); откачивающим действием струи ртутного пара из манометра в ловушку; отличием формы конца запаянного капилляра от формы мениска ртути, что ограничивает минимальное значение на уровне 5...10 мм. Кроме того, по технологическим соображениям диаметр капилляров удобно выбирать не меньше 1 мм, а объем измерительного баллона определяется прочностью стекла и обычно не превышает 1 л, что дает максимальное значение коэффициента компрессии $2,5 \cdot 10^5$.

Для измерения более высоких давлений требуется манометр с очень длинными (или переменными по сечению) капиллярами. В области давлений более 10 Па можно пользоваться обычными гидростатическими манометрами без предварительного сжатия газа. Для уменьшения откачивающего действия струи ртутного пара трубка T сделана в виде капилляра, охлаждаемого водой. Компрессионный манометр относится к абсолютным приборам и используется в качестве образцового для градуировки других приборов. Его показания не зависят от рода газа.

Однако компрессионным манометром нельзя измерить давление паров тех веществ, у которых упругость насыщенных паров при температуре измерения меньше давления в измерительном капилляре после сжатия; нельзя проводить непрерывное измерение давления. Недостатком манометра является также то, что он должен присоединяться к вакуумной системе через азотную ловушку.

Тепловые преобразователи

Принцип действия тепловых преобразователей основан на зависимости теплопередачи через разреженный газ от давления. Передача теплоты происходит от тонкой металлической нити к баллону, находящемуся при комнатной температуре. Металлическая нить нагревается в вакууме путем пропускания электрического тока.

Уравнение теплового баланса такого прибора можно представить в

следующем виде:

$$I_n^2 R = E_k + E_m + E_u + E_m, \quad (5.4)$$

где I_n — ток, проходящий через нить; R — сопротивление нити; E_k , E_m , E_u , E_m — потери теплоты за счет конвекции, теплопроводности газа, излучения нити и теплопроводности материала нити.

Конвективным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т. е. $E_k \approx 0$, а потери теплоты излучением:

$$E_u = K_u(T_n^4 - T_0^4)A, \quad (5.5)$$

где A — поверхность нити; K_u — коэффициент излучения материала нити; T_n и T_0 — температуры нити и баллона.

Тепловые потери нити за счет передачи теплоты по материалам нити и электродов, соединяющих нить с корпусом преобразователя,

$$E_m = b(T_n - T_0)f, \quad (5.6)$$

где b — коэффициент теплопроводности материала нити; f — сечение нити.

Потери теплоты через газовый промежуток:

$$E_m = \lambda(T_n - T_0)A, \quad (5.7)$$

где $\lambda = -Ap/(p+B)$ - коэффициент теплопроводности газа.

В области низкого вакуума $p \gg B$, а коэффициент теплопроводности газа не зависит от давления. Давление $p \approx B$, соответствующее переходу от среднего в низкий вакуум, является верхним пределом измерения теплового манометра. В области высокого вакуума, когда $p \ll B$, коэффициент теплопроводности пропорционален давлению и при $\alpha = 1$ из (10.4) следует:

$$\lambda_v = K_T p \quad (5.8)$$

Измерительное уравнение теплового преобразователя с учетом уравнений можно записать так:

$$p = \frac{I_n^2 R - (E_u + E_m)}{K_T (T_n - T_0)}. \quad (5.9)$$

Для точного измерения давления необходимо, чтобы E_T составляло значительную долю от $E_u + E_m$, т. е. чтобы сумма $E_u + E_m$ была существенно меньше мощности $I_n^2 R$, выделяющейся в нити манометра. Поэтому условие $I_n^2 R - (E_u + E_m) \geq 0,01 I_n^2 R$ определяет нижний предел измерения манометра. Из уравнения (10.6) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала нити I_n и температуры нити T_n .

Существует два метода работы тепловых манометров: постоянной температуры нити и постоянного тока накала. Градуировочные кривые теплового манометра, показанные на рис. 6.6 *а*, *б* для обоих методов работы, представляют собой в средней части параболу и гиперболу. Концы градуировочных кривых у верхнего и нижнего пределов измерения не

описываются уравнением (5.9) и переходят в линии, параллельные оси давления.

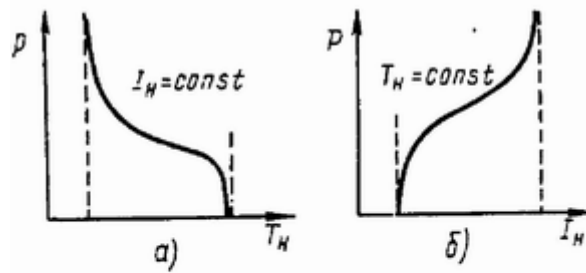


Рис. 6.6. Градуировочные кривые теплового преобразователя:
а — при постоянном токе накала; б — при постоянной температуре нити

Тепловые преобразователи в зависимости от способа измерения температуры делятся на *термопарные* и *преобразователи сопротивления*.

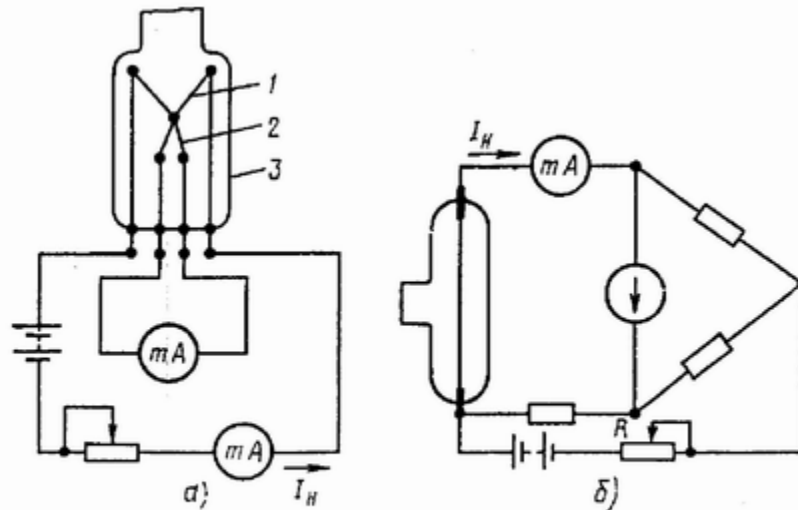


Рис. 6.7. Схемы тепловых преобразователей:
а — термопарного; б — преобразователя сопротивления

В *термопарном преобразователе* (рис. 6.7, а) температура нити 1 измеряется термопарой 2. Электроды расположены в стеклянном или металлическом баллоне 3, имеющем патрубок для подключения к вакуумной системе. ТермоЭДС термопары измеряется милливольтметром, ток накала нити регулируется реостатом и измеряется миллиамперметром.

В преобразователе *сопротивления* для измерения температуры используется зависимость сопротивления нити от температуры. Он включается в мостовую схему (рис. 6.7, б). Ток накала нити измеряется миллиамперметром, включенным в то же плечо моста, что и преобразователь, а температура нити — по току гальванометра в измерительной диагонали моста. Ток накала регулируется реостатом.

Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

Преимуществом тепловых преобразователей является то, что они измеряют общее давление всех газов и паров, присутствующих в вакуумной системе, и обеспечивают непрерывность измерения давления. Инерционность показаний, связанная с тепловой инерцией нити, изменяется от нескольких секунд при низких давлениях до нескольких миллисекунд при высоких давлениях.

Тепловые преобразователи как приборы для относительных измерений давления обычно градуируются по компрессионному манометру. Диапазон рабочих давлений $5 \cdot 10^3 \dots 10^{-1}$ Па.

Электронные преобразователи

Принцип действия электронных преобразователей основан на пропорциональности между давлением и ионным током, образовавшимся в результате ионизации термоэлектронами остаточных газов.

Существует две схемы электронного преобразователя: с внутренним и внешним коллектором.

Схема с *внутренним* коллектором (рис. 6.8, а) аналогична обычному триоду. Коллектором ионов является сетка, на которую относительно катода подается отрицательное напряжение в несколько десятков вольт, а на анод — положительное напряжение 100— 200 В. Электроны на пути от катода к аноду (ток I_e) соударяются с молекулами остаточных газов, и образовавшиеся положительные ионы попадают на сетку, создавая ионный ток I_u , измеряемый гальванометром.

В схеме с *внешним* коллектором (рис. 6.8, б) потенциалы сетки и анода меняются местами, и коллектором становится анод. Электроны, летящие от катода к сетке, совершают вокруг ее витков ряд колебаний, что увеличивает длину траектории электронов и повышает вероятность ионизации молекул остаточных газов. Это делает схему с внешним коллектором более чувствительной, несмотря на то, что часть положительных ионов, образовавшихся между сеткой и катодом, не участвует в измерении давления.

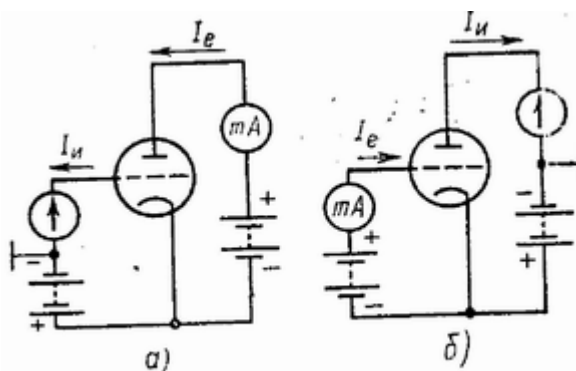


Рисунок 6.8 - Схемы электронных преобразователей: а – с внутренним коллектором; б – с внешним коллектором

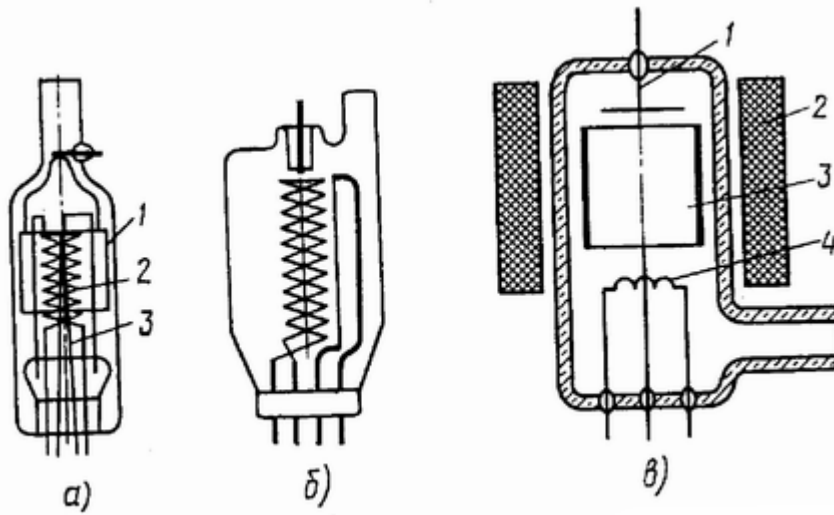


Рисунок 6.9 - Конструктивные схемы электронных преобразователей: *а* – с внешним коллектором; *б* – с осевым коллектором; *в* – с магнитным полем

Магнитные преобразователи

Принцип действия магнитных преобразователей основан на зависимости тока самостоятельного газового разряда в скрещенных магнитном и электрическом полях от давления. Электродные системы, обеспечивающие поддержание самостоятельного газового разряда при высоком и сверхвысоком вакууме, бывают нескольких видов.

Ячейка Пеннинга (рис.6.10, *а*) состоит из двух дисковых катодов 1 и цилиндрического анода 2; в магнетронном преобразователе (рис.6.10, *б*) в отличие от ячейки Пеннинга катоды соединены между собой центральным стержнем; в инверсно-магнетронном преобразователе (рис. 6.10, *в*) центральный стержень выполняет роль анода, а наружный цилиндр становится катодом.

Все электроды находятся в постоянном магнитном поле, на анод подается положительное относительно катода напряжение 2...6 кВ, катод заземлен и соединяется с входом усилителя постоянного тока.

Электроны, вылетающие из катода в результате автоэлектронной эмиссии, в магнетронном или инверсно-магнетронном преобразователе движутся в скрещенных электрическом и магнитном полях по циклоиде, образованной окружностью диаметром: $D = 2m |E|/(qB^2)$, катящейся по окружности радиуса r с угловой частотой вращения $\omega = qB/m$ и тангенциальной скоростью $v_m = E/B$ (E — напряженность электрического поля; B — магнитная индукция; m и q — масса и заряд электрона). В ячейке Пеннинга электроны движутся по спиральным траекториям между катодными пластинами.

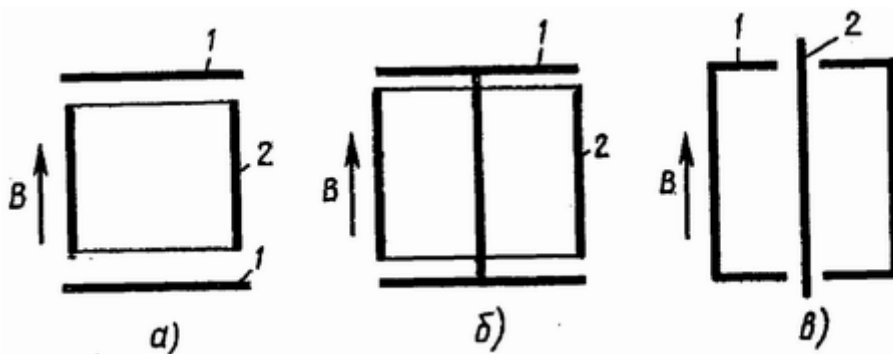


Рисунок 6.10 - Электродные схемы магнитных преобразователей: *a* – ячейка Пеннинга; *б* – магнитронная; *в* – инверсно-магнитронная

Магнитная индукция B выбирается больше критического значения, соответствующего равенству диаметра электрода и диаметра окружности, по которой движется электрон, и составляющего в современных приборах $\sim 0,1$ Тл. При соударении с молекулой остаточного газа электрон теряет часть энергии на ее ионизацию и перемещается в радиальном направлении к аноду. В связи с тем, что радиальная скорость электронов значительно меньше, чем тангенциальная, при низких давлениях в разрядном промежутке образуется отрицательный объемный заряд. Положительные ионы, образовавшиеся в результате столкновения с электронами, движутся к катоду. Так как их масса значительно больше, чем у электрона, то магнитное поле практически не влияет на траекторию движения ионов. Соударение положительных ионов с катодом приводит к появлению вторичных электронов, ток которых пропорционален ионному току.

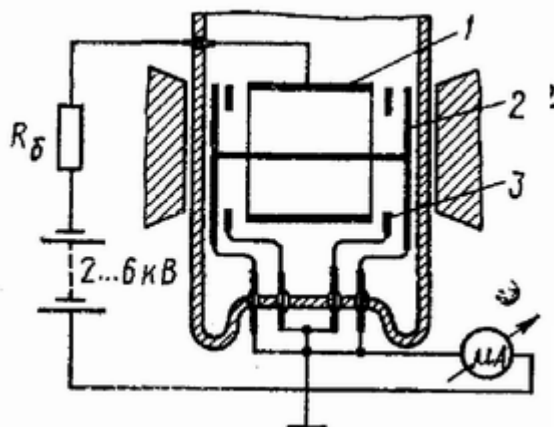


Рисунок 6.11 - Схема магнетронного преобразователя с уменьшенными фиксированными токами

Разрядный ток магнитного преобразователя нелинейно зависит от давления.

Верхний предел измерения связан с ограничением максимального разрядного тока балластным сопротивлением, защищающим измерительный прибор от возникновения дугового разряда. Для расширения верхнего

предела измерения следует уменьшить анодное напряжение и размеры разрядного промежутка. Обычно верхний предел измерения находится в области давлений 10...100 Па. Нижний предел измерения определяется временем зажигания разряда и значением фонового тока. В современных приборах он составляет 10^{-11} Па. Для уменьшения фонового тока применяются специальные экраны 3 (рис. 6.11), расположенные в промежутке между катодом 2 и анодом 1, где напряженность электрического поля максимальна. Большая часть фонового тока в этом случае переходит на корпус, минуя микроамперметр, которым измеряется разрядный ток.

Для обеспечения зажигания разряда при низких, давлениях необходимо повышать анодное напряжение и увеличивать размеры разрядного промежутка.

Для облегчения зажигания разряда в сверхвысоком вакууме на экранных пластинах устанавливают острые иголки, увеличивающие автоэлектронную эмиссию. Наиболее надежным способом обеспечения быстрого зажигания разряда является использование нагреваемых элементов, включение которых приводит к резкому повышению давления или термоэмиссии электронов.

При применении сильных магнитных полей ($B > 0,1$ Тл) значение постоянной n в формуле, описывающей чувствительность прибора, стремится к единице. При этом расширяется диапазон работы прибора в области как низких, так и высоких давлений.

Магнитные преобразователи, так же как и электронные, имеют неодинаковую чувствительность к различным газам. Преимуществом магнитного преобразователя перед электронным является более высокая надежность в работе в связи с заменой накаливаемого катода холодным, а недостатком — нестабильности, связанные с колебаниями работы выхода электронов при загрязнении катодов.

Эти нестабильности особенно заметны при работе преобразователя в вакуумных системах с парами масла, продукты разложения которого при ионной бомбардировке и масляные диэлектрические пленки, покрывающие поверхности электродов, могут в несколько раз изменить постоянную преобразователя. Во избежание этого необходимо применять самоочищающиеся магнитные преобразователи, работающие на переменном токе. В таких преобразователях катод и анод меняются местами в соответствии с полупериодами питающего напряжения, а очистка их поверхностей осуществляется ионной бомбардировкой.

5.2 Откачные средства вакуумных систем

Общая характеристика насосов

Вакуумные насосы по назначению делятся на:

- высоковакуумные
- низковакуумные

По физическому признаку работы делятся на:

- механические
- сорбционные
- ионные

Механические насосы бывают:

- объемные
- молекулярные, основанные на передаче количества движения молекулами газа от движущейся поверхности.

Насосы объемного типа осуществляют откачку за счет периодического изменения объема рабочей камеры. По конструкции они бывают:

- поршневые
- жидкостно-кольцевые
- ротационные

Насосы с передачей количества движения молекулами газа бывают:

- водоструйные
- эжекторные
- диффузионные
- молекулярные, характеристики, которых основаны на закономерностях внутреннего трения в газах.

Откачные насосы на основе сорбционных явлений бывают:

- испарительные (используется хемосорбция)
- адсорбционные (криогенные насосы, в которых работают процессы физической адсорбции и конденсации)

В ионно-адсорбционных насосах работают заряженные молекулы, движущиеся под действием электрического поля.

Основные параметры вакуумных насосов:

- быстрота откачки
- предельное давление
- наименьшее рабочее давление
- наибольшее рабочее давление
- наибольшее давление запуска
- наибольшее выпускное давление

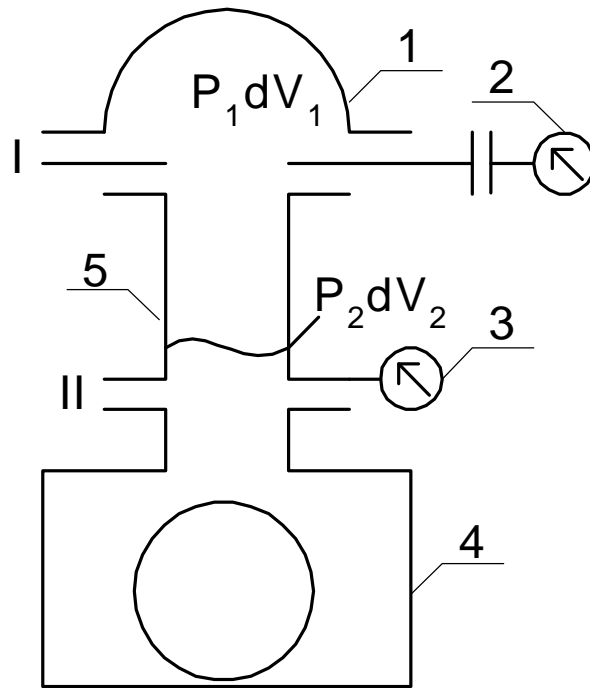


Рисунок 5.1 – Схема откачной системы

1 – откачиваемый объем; 2, 3 – манометры для измерения давления;
4 – насос; 5 - соединительный трубопровод

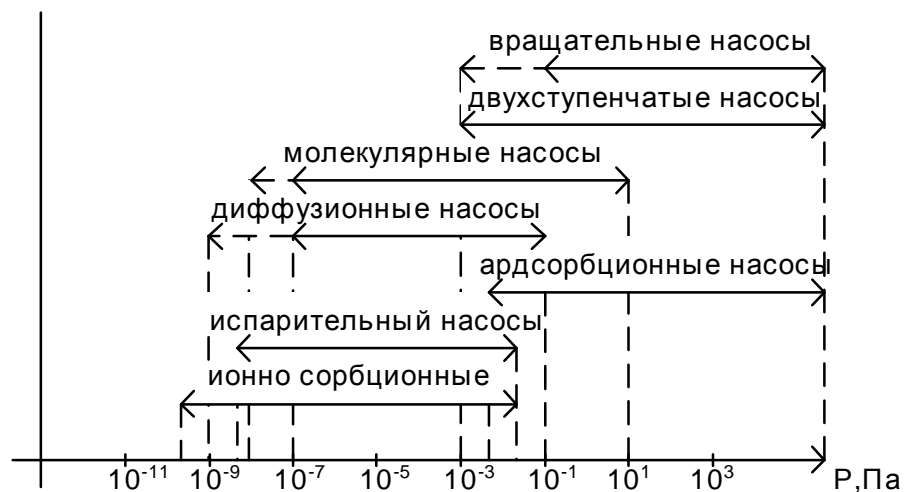


Рисунок 5.2 - Диапазон рабочих давлений вакуумных насосов

Предельное давление насоса $P_{пр}$ – это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объема. Быстрота действия насоса стремится к нулю при приближении к предельному давлению. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется газовыделением материалов, течами.

Наименьшее рабочее давление вакуумного насоса P_m – минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление приблизительно на порядок больше предельного давления.

Наибольшее рабочее давление P_6 – максимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

Давление загрузки P_3 – максимальное давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу.

Наибольшее выпускное давление P_6 – максимальное давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять откачку.

Объемная откачка

Процесс откачки состоит из:

- всасывания газа за счет расширения рабочей камеры
- уменьшения объема рабочей камеры
- сжатие находящегося в ней газа
- удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу

Конструкция вращательных вакуумных насосов

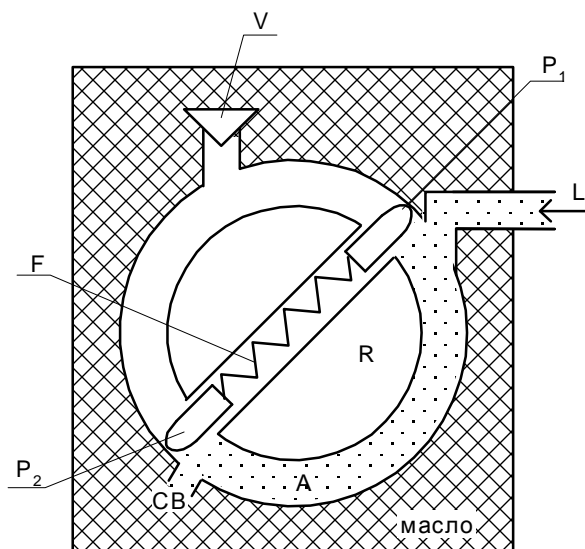
Насосы предварительного вакуума (иначе форвакуумные насосы) работают при атмосферном давлении для достижения вакуума порядка 10^{-1} – 10^{-2} мм рт ст. Для достижения высокого вакуума до 10^{-6} мм рт ст служат высоковакуумные вращательные насосы Рутса или молекулярные насосы, диффузионные и пароструйные насосы, которые могут работать только от 10 до 10^{-1} мм рт ст, т.е. при предварительном разряжении. Для достижения такого давления используются поршневые, пластинчато-роторные, плуктерные насосы.

Поршневые насосы работают за счет изменения объема. Быстрота откачки $S_{эф} = 12..1000$ л/сек. Предельное давление $4 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$ мм рт ст.

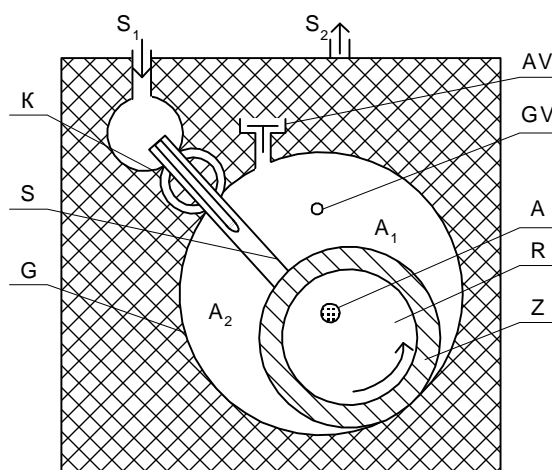
Пластинчато-роторные насосы

Применяют с газовым балластом и без него. Внутри корпуса насосы вокруг оси, смещенной относительно оси корпуса вращения стальной барабан – ротор R с двумя подвижными пластинами P_1 и P_2 , которые прижимаются, а корпусу при помощи пружины F . При вращении ротора объем камеры всасывания A вначале увеличивается и газ засасывается в нее через впускной парубок L . Затем при отключении входа пластиной P_2 происходит сжатие объема и сжатый до 700 мм рт. ст. через выпускной парубок и клапан V выбрасывает в атмосферу. Уплотнение внутри насоса происходит с помощью заполнения объема маслом.

Быстрота откачки пластинчато-роторного насоса $S_{эф} = 2 \cdot 10^3$ м³/час или 0,5..3 л/сек. Число оборотов $n = 400-500$ в мин. Одноступенчатые насосы обеспечивают получение предварительного давления (полной) $P_{np} = 0,05$ мм рт. ст. (парциальное давление газов $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.), а двухступенчатые с газовым балластом – 0,005 мм рт. ст. (парциальное давление газов 10^{-3} мм рт. ст.).



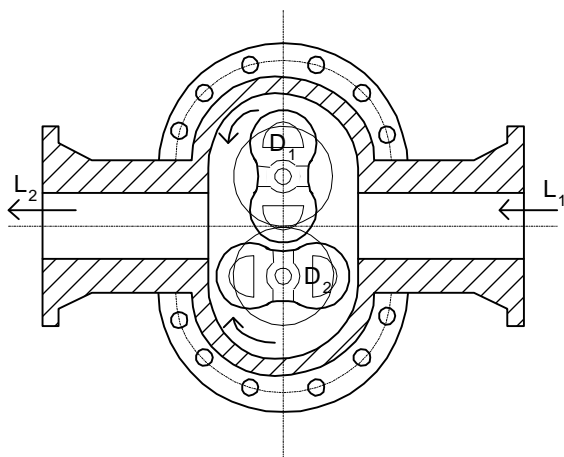
1)



2)

Рисунок 5.2- Схемы пластинчато-роторного (1) и пластинчато-статорного (2) насосов

Насосы для получения среднего и высокого вакуума



Насос Рутца содержит два ротора D1 и D2, имеющих форму восьмерки и вращающихся без соприкосновения (без трения). Воздушная щель между ними меньше сотых долей.

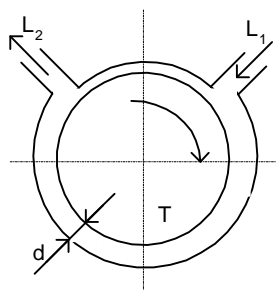
В L1 всасывается газ, в L2 газ выбрасывается в атмосферу. Число оборотов 1000-3000 об/мин.

Для исключения тока обратного газа в L2 ставят насос предварительного разряжения малой

мощности. Быстрота откачки 5-5000 л/с.

В интервале давлений от 10 до 10^3 мм рт. ст. быстрота откачки постоянна. Предельный вакуум достигается при $p = 10^{-5}$ мм рт. ст. Применяют при создании вакуума при плавке, сушке, спекании.

Молекулярные воздушные насосы



Принцип действия этих высоковакуумных насосов основан на том, что вращающиеся с большой скоростью барабаны или диски сообщают молекулам, сталкивающимся с их поверхностью, компоненту скорости, а направлении вращения.

Молекулярный насос Геде. Барабан T, вращающийся со скоростью от 2000 до 12000 об/мин в корпусе. Узкий зазор по короткому пути от L1 к L2 (несколько сотых мм) и шириной в 1 мм по более длинному пути.

Условие влечения ротором молекул газа в том, что средняя длина пробега молекул газа l_z у впускного патрубка должна быть больше, чем ширина зазора d . В этом случае молекулы меньше сталкиваются друг с другом и больше с поверхностью барабана. При ширине зазора в 1 мм условие $l_z > d$ выполняется при давлении 0,1 мм рт. ст. – т.е. предварительный вакуум.

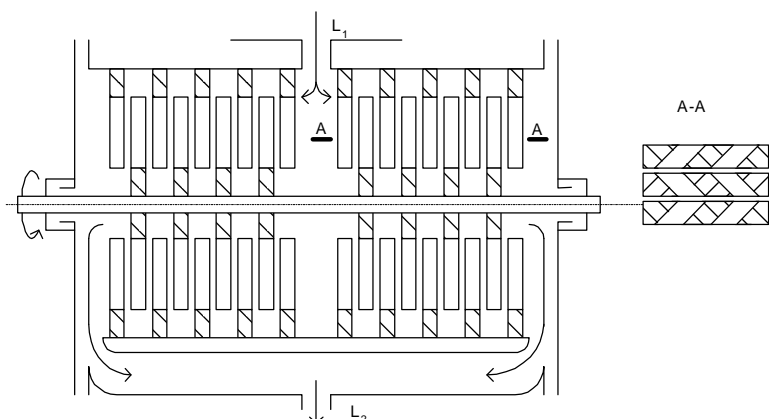
Быстрота откачки $3 \cdot 10^3$ л/ч (1-3 л/сек) и растет с увеличением скорости вращения барабана и пропорционально корню квадратному из молекулярного веса откачиваемых газов. Для быстроты откачки включают последовательно несколько насосов.

Быстрота откачки падает с уменьшением давления из-за обратного течения газов.

Предельный вакуум 10^{-6} мм рт. ст. при предварительном вакууме 1 мм рт. ст.

Достоинства: сравнительно высокий вакуум и возможность откачки одновременно газов и паров.

Недостатки: сравнительно небольшая скорость откачки и точное соблюдение ширины зазоров.



Молекулярные насосы с аксиальным прохождением воздуха (турбомолекулярным)

В цилиндрическом корпусе вращается ряд дисков закрепленных на одной оси между рядом других дисков, неподвижно закрепленных к корпусам. На дисках в радиальном

направлении от края диска к его середине вырезаны отверстия, таким образом, что их оси образуют угол с осью вращения.

Молекулы, поступающие по отсасывающему патрубку, приобретают в этих прорезях импульс аксиальном направлении в сторону предварительного вакуума.

q_1 – входящий поток,

q_2 – обратный поток,

J_p - вектор относительной скорости молекул,

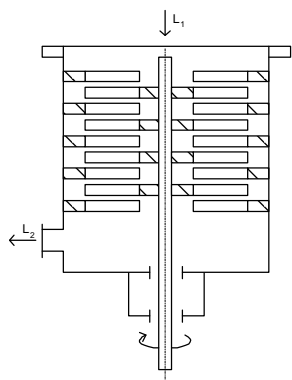
J_{2p} - вектор тепловой скорости молекул.

Вектор скорости потока q_1 параллельно каналу, вектор скорости потока q_2 перпендикулярен каналу, т.е. проводимость канала потокам q_1 и q_2 различна: для q_2 – труба с углом 90° .

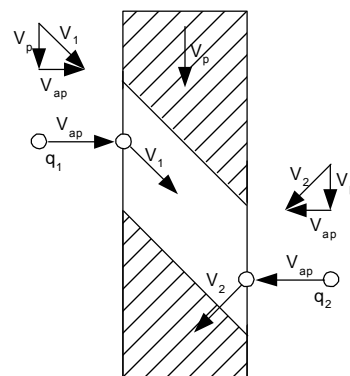
Степень сжатия, приходящаяся на 1 пару дисков мала, но мало обратного газа.

Ширина пазов в дисках до 1 мм. Увеличение степени сжатия достигают применением большого числа дисков (до 20 шт)

Турбомолекулярные насосы образуют большой скоростью откачки 5-50 м³/ч (1-140 л/сек), при числе оборотов $n = 4000-16000$ об/мин высоким предельным вакуумом до $5 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст. работают при предварительном разряжении 10^{-3} мм рт. ст. и требуют мощных насосов предварительного разряжения с быстротой откачки 500 м³/ч.



Имеются насосы с круговыми канавками и со спиральными канавками а также молекулярные насосы с вертикальным валом.



Пароструйная откачка

При пароструйной откачке молекулы газа, поступающие в насос, взаимодействуют со струей пара, имеющей звуковую или сверхзвуковую скорость, и получают дополнительную скорость в направлении насоса предварительного разряжения.

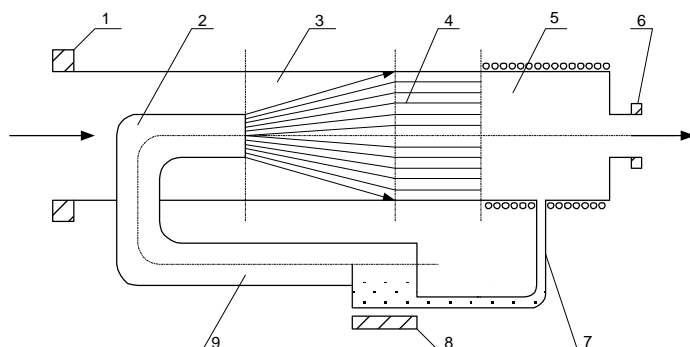


Рисунок 5.3 - Схема пароструйного насоса:

1- входной патрубок; 2 - сопла; 3 - камера смешения паровой струи; 4 - запирающий канал; 5 - камера разделения рабочего пара и откачиваемого газа; 6 - выходной патрубок; 7 - трубопровод; 8 - кипятильник; 9 - паропровод.

При *низком вакууме* молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называются *эжекторными*.

В области *высокого вакуума* все молекулы откачиваемого газа, перемещающиеся за счет сомодиффузии, непосредственно взаимодействуют с движущейся струей. Такие насосы называются *диффузионными*.

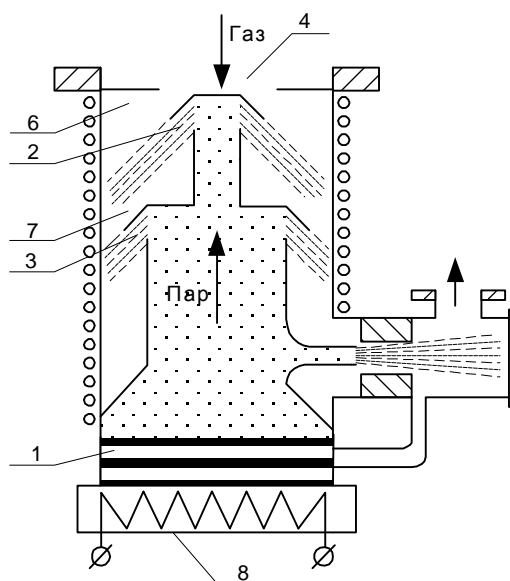


Рисунок 5.4 - Схема диффузионного насоса

Находящаяся в испарителе 1 рабочая жидкость (масло или ртуть) приводится в кипящее состояние действием электрического нагревательного элемента 8, образующийся пар устремляется вверх по паропроводу и выходит через сопла 2 и 3, направляющие поток вниз. Молекулы пара с высокой скоростью проходят кольцевые зазоры 6 и 7.

Молекулы газов, попадающие в высоковакуумную часть насоса 4, вследствие обычных соударений с другими молекулами и со стенками насоса достигают зазора 6 и увлекаются потоком пара вниз.

Поток пара охлаждается стенками насоса, пары конденсируются и возвращается в испаритель. Сообщенное молекулам газа направление движение способствует их накоплению в нижней части насоса.

Давление, до которого может быть сжат газ действием первого сопла 2, может оказаться недостаточно эффективным для работы насоса и поэтому ставят дополнительные сопла.

Быстрота действия насоса примерно пропорциональна сечению кольцевого зазора между первым соплом и стенками, через которые молекулы газа попадают в поток пара.

Уменьшение площади поперечного сечения у второго сопла приводит к уменьшению скорости откачки, но, как правило, градиент давления и максимальное давление на выходе возрастают, т.к. поток пара концентрируется на меньшей рабочей поверхности (меньшее расширение после выхода из сопла).

Насосы эжекторные

Этот вид вакуумных насосов, способных работать на атмосферное противодавление, чаще используется в промышленности. Здесь используется мощная струя водяного пара или масла, которое увлекает с собой откачиваемый газ.

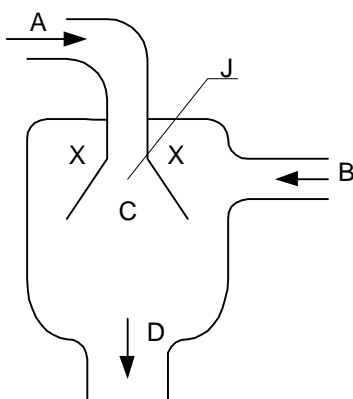


Рисунок 5.5 - Схема эжекторного насоса

Поток пара А, проходя через сопло J и уменьшая давление в пространстве x-x, удаляет газ из откачиваемого объема. Затем газ выбрасывается в

атмосферу, а пары рабочей жидкости конденсируются и возвращаются в испаритель.

Диффузионные насосы, предназначенные для работы в диапазоне 10^{-1} - 10 Па, называются *бустерными*. В них применяют мощные подогреватели, термостойкие рабочие жидкости.

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляют следующие требования:

- минимальная упругость паров при комнатной температуре и максимальная при рабочей температуре в кипятильнике
- стойкость к разложению при нагревании
- минимальная способность растворять газы
- химическая стойкость по отношению к откачиваемым газам и к материалам насоса
- малая теплота парообразования

Минеральные масла ВМ-1, ВМ-5 – продукты переработки нефти. Упругость паров при комнатной температуре 10^{-6} Па. Горят.

Полифениловые эфиры ПФЭ – низкое давление паров 10^{-9} Па и высокая термоокисляемость.

Кремниевые органические жидкости ВКЖ-94, ПФМС-2.

Полисилоксалиновые полимерные соединения $(\text{CH}_3)_2\text{SiO}$.

Высокая термоокислительная стойкость и упругость паров 10^{-5} Па

Для уменьшения обратного потока паров рабочей жидкости откачиваемом объеме используют ловушки. К ловушкам предъявляются следующие основные требования: максимально защитное действие на заданный срок службы и минимальное сопротивление основному потоку откачиваемого газа. Кроме того, возможность регенерации, простота и технологичность конструкции, удобство эксплуатации.

Механические: за счет использования пористого материала с порами $\approx 0,1$ мкм и менее. Поглощение паром масла осуществляется адсорбцией на стенках капиллярных каналов. Период непрерывной работы составляет несколько сотен часов, по истечении которого элемент должен быть заменен, продут воздухом или прогрет до $T \approx 500^\circ\text{C}$. Материал: пористое стекло, стекловолокно, пористая медь.

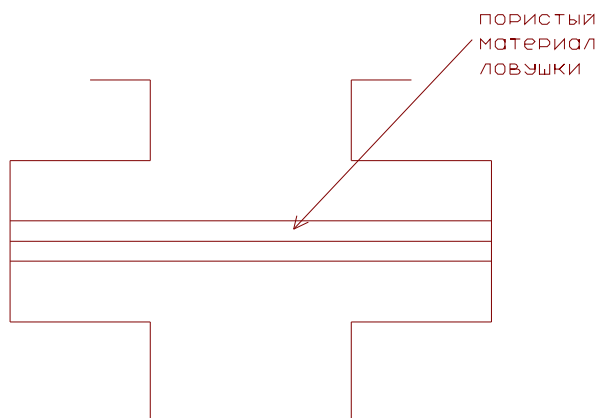


Рисунок 5.6 - Схема механической ловушки

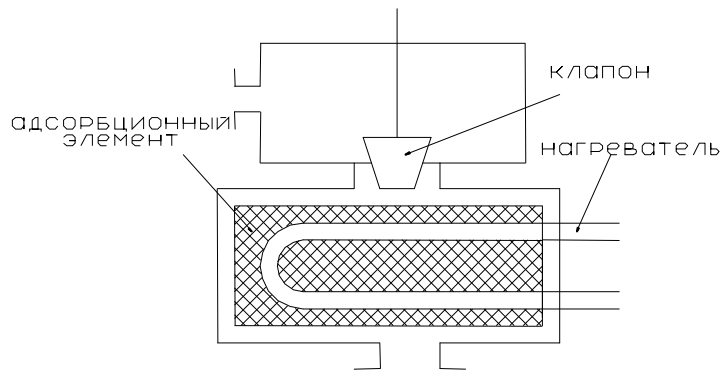


Рисунок 5.7 - Схема адсорбционной ловушки

Охлаждение ловушек водой повышает их защитные действия, но снижает проводимость. Увеличение срока службы ловушек и их эффективности может быть достигнуто за счет добавки в пористые материалы адсорбционные материалы: активные угли цеолиты с размером пор $\approx 5 \text{ \AA}$, активную окись алюминия. Для удаления поглощенных в адсорбционных элементах масла и воды ловушку следует прогреть нагревателем до $300\text{-}500^\circ\text{C}$. Клапан во время обезгаживания закрыт.

Ионные ловушки

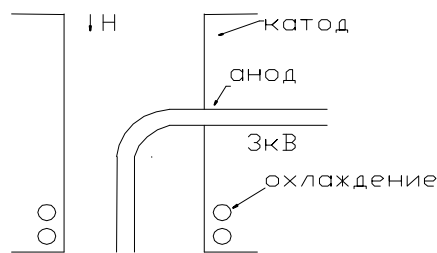


Рисунок 5.8 - Схема ионной ловушки

Цилиндр (катод) с осевым электродом (анод) разряд гонит при наличии осевого магнитного поля и напряжения 3 кВ. Образовавшиеся положительные ионы бомбардируют поверхность корпуса, разрушая поверхностную пленку. Это приводит к выделению водорода и полимеризации углеводородов в твердые вещества.

Гетероионные насосы

Ионно-сорбционная откачка использует два типа поглощения газа: внедрение ионов в объем твердого тела под действием электрического поля и химического взаимодействия откачиваемых газов с тонкими пленками активных металлов. Высокоэнергетичные ионы или нейтральные частицы, бомбардируя твердое тело, проникают в него на глубину достаточную для их растворения. Это ионная откачка. При откачке существует предельное количество поглощенного газа единицей объема тела. При максимально допустимом значении поглощения газа может объединиться в пузырьки и разорвать металл. Это явление получило название “*блистер-эффект*”.

Сорбционное поглощение пленками получаемыми при ионном распылении, откачиваемых газов называется *хемосорбционной откачкой*. Показателем активности пленки, получаемой ионным распылением, является теплота адсорбции поглощаемого газа на материале пленки. Для H_2 – 19,3 кДж/моль, CO – 419, N_2 – 356, O_2 – 813, Ar – 8,38. Все газы, кроме инертных, поглощают за счет хемосорбции. Инертные газы плохо откачиваются за счет хемосорбции. Материал распыляемых пленок Ti, Zr, Ta, Ва, Mo, W, Hf.

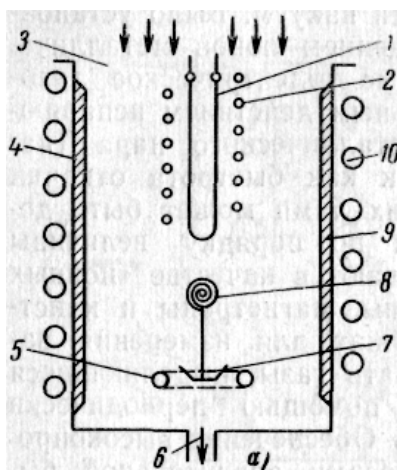


Рисунок 5.9 - Схема гетероионного насоса:

1 - накаливаемый катод, 2 – сетка, 3 - впускной патрубок, 4 - коллектор ионов, 5 - кольцеобразный катод, 6 - выпускной патрубок, 7 - тигель для распыления титана нагреваемый электронным пучком (является анодом $U = 750В$), 8 - катушка с запасом титановой проволоки, 9 - слой осажденного титана с заключенными в нем молекулами газа, 10 – охлаждение водой.

Ионизация газа производится следующим образом – электроны, эмитированные катодом 1, ускоряются сеткой ионизируют газы и пары Ti. Образовавшиеся ионы ускоряются по направлению к внутренней стенке насоса, действующий как коллектор ионов. Там ионы удерживаются и вместе с нейтральными молекулами газа, диффундирующими к стенке, оказываются погребенными под новыми, располагающимися сверху слоями газопоглотителя.

При скорости испарения Ti 5,3 мг/мин и давлении порядка 10^{-6} мм. рт. ст. быстрота откачки насоса для $H_2 = 3000$ л/см, для $N_2 - 2000$ и $O_2 - 1000$ л/см, Ar – 5 л/см. предварительное давление, т.е. давление, при котором насос начинает работать, равно 10^{-2} мм. рт. ст., предельный вакуум 10^{-10} мм. рт. ст.

Гетероионный насос с холодным катодом (электроразрядный насос)

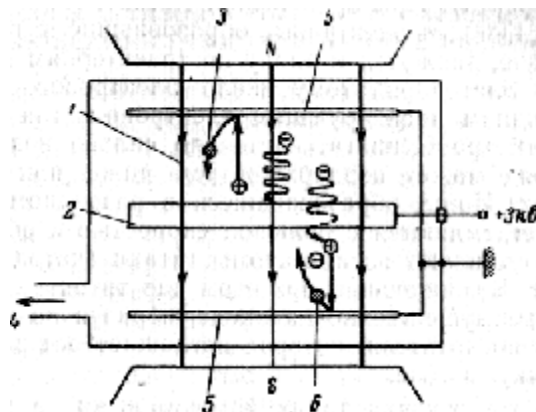


Рисунок 5.10 - Схема электроразрядного насоса:

- 1 - магнитное поле (В-1000 гс); 2 - анод с осажженным слоем титана; 3 - атом титана; 4 - к откачиваемому объему; 5 - холодный катод (Ti); 6 - атом титана; 7 - вид сверху на анод.

В коробочке из титана (является холодным катодом) образуется тлеющий разряд за счет анодного напряжения +1-3 кВ. при наличии магнитного поля электроды движутся к аноду по спиральным траекториям. Это увеличивает длину прохождения электроном, увеличивает вероятность столкновения и ионизации нейтральных атомов. Приложение магнитного поля позволяет работать при низком давлении. Образовавшиеся ионы устремляются к катодам (титановым) с большой скоростью и выбивают из них атомы титана (катодное распыление). Возникающие при этом пары титана конденсируются преимущественно на аноде и на остальных элементах конструкции, образуя зеркало газопоглощения, которое поглощает все захваченные молекулы газа. Быстрота откачки такого насоса лежит между 1-1000 л/см. Начинает работать при давлении 10^{-2} мм. рт. ст. и предельном вакууме 10^{-10} мм. рт. ст.

Преимущество гетероионных насосов – возможность получения хорошего вакуума без паров масла, и возможность в ходе откачки работы без включения насоса предварительного вакуума.

Недостаток - наличие опасностей внезапного выброса газа из осажденных слоев. Низкое откачивающее действие по отношению к инертным газам. Ограниченный ресурс работы.

Криогенные насосы

Насосы с газопоглощением охлажденными поверхностями (криогенные насосы). Криогенная откачка может осуществляться за счет конденсации или адсорбции.

Криоконденсационная откачка возможна при условии, что давления откачиваемого газа в вакуумной системе выше давления его насыщенных паров в насосе. В связи с тем, что теплоты конденсации обычно меньше теплот адсорбции, криоконденсация по сравнению с криоадсорбцией наблюдается при более низких температурах, что затрудняет техническую реализацию.

Температуры кипения при атмосферном давлении $N_2 - 77,3K$, $Ne - 27,2K$, $H_2 - 20,4 K$.

Криоадсорбционная откачка осуществляется путем адсорбции газов на охлаждаемых поверхностях. Принцип действия криогенных насосов аналогичен принципу охлаждаемых ловушек, с той разницей, что в них применяются для охлаждения существенно более низкие температуры.

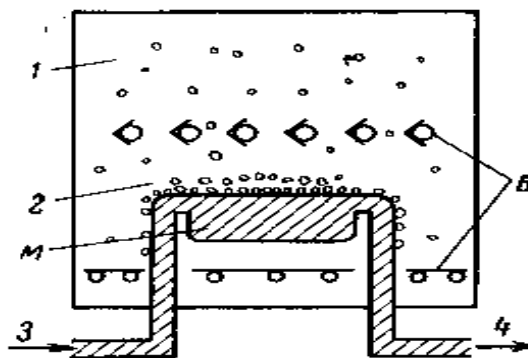


Рисунок 5.11 Схема криогенного насоса:

1 - откачиваемый объем, 2 - сконденсировавшиеся молекулы газа, 3 - жидкий гелий (4К), 4 - пар

В охлаждающие ловушки, охлаждаемые жидким азотом (76К) для защиты от теплового излучения. В этих насосах через металлический сосуд, защищенный от теплового излучения охлаждаемыми ловушками и находящийся внутри откачиваемого объема, пропускается жидкий гелий (температура кипения $T_k = 4K$), водород ($T_k = 20K$) или азот ($T_k = 76K$), при давлении насыщенных паров газа они начинают конденсироваться на стенках насоса.

Оборудование для наращивания эпитаксиальных слоев

Эпитаксия — процесс ориентированного наращивания, в результате которого образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы — подложки с образованием переходного эпитаксиального слоя.

Основными этапами эпитаксии из газовой фазы являются:

формирование, контроль и управление исходной для процесса парогазовой смесью заданного состава;

транспортировка парогазовой смеси в реактор и распределение ее по объему реакционной зоны;

нагрев подложек до требуемой температуры и осаждение на них вещества из газовой фазы;

удаление продуктов реакции и их утилизация.

Основными параметрами эпитаксиальных структур являются толщина наращиваемого слоя и удельное сопротивление. Для получения этих параметров с требуемой точностью ($\pm 5\%$) установка для эпитаксиального наращивания должна удовлетворять следующим требованиям:

поддерживать температуру подложек с точностью $\pm 5\text{ K}$;

обеспечивать постоянный состав парогазовой смеси и стабилизацию газовых потоков;

создавать одинаковые условия протекания процесса для всех подложек, находящихся в реакторе;

обеспечивать соблюдение полупроводниковой гигиены;

Кроме того, она должна иметь технические средства (датчики) для измерения основных параметров процесса газовой эпитаксии.

Для выполнения перечисленных требований установка для эпитаксиального наращивания должна содержать следующие элементы: реактор, газовую систему, систему нагрева, систему управления процессом и вспомогательные устройства.

6.1 Реакторы для газовой эпитаксии

Разброс параметров эпитаксиальных слоев, выращенных в конкретном реакторе на обрабатываемых подложках, зависит от особенностей конструкции реакционной камеры, связанных с созданием одинаковых условий протекания процесса при групповой обработке пластин в установках

периодического действия, возможностью управления процессами тепло- и массопереноса и обеспечения оптимальных условий наращивания эпитаксиального слоя для всех обрабатываемых подложек.

Реакторы изготавливают из кварцевого стекла, коррозионно-стойкой стали, хромоникелевых сплавов и монель-металла.

Реакторы установок эпитаксиального наращивания можно разделить на два типа: горизонтальный и вертикальный.

6.1.1 - Горизонтальный реактор

Реакторы горизонтального типа не имеют внутри движущихся частей. Поток парогазовой смеси подается в реактор параллельно его оси. Схема реактора горизонтального типа приведена на рис. 6.1.

Реактор 1 изготавливают из кварцевой трубы круглой или прямоугольной формы. Внутри реактора размещают подложкодержатель 3, выполненный из графита и установленный на подставках с определенным углом наклона для выравнивания состава парогазовой смеси вдоль длины подложкодержателя.

В процессах эпитаксиального роста кремния при использовании SiH_4 , SiHCl_3 или SiCl_4 угол наклона изменяют в соответствии с неравенством подложкодержателя

$$\text{tg } \alpha \text{ SiH}_4 > \text{tg } \alpha \text{ SiHCl}_3 > \text{tg } \alpha \text{ SiCl}_4$$

На подложкодержателе 3 размещают подложки 4. Для нагрева подложек используют индукционный, резистивный или лучистый нагрев. При индукционном нагреве применяют индуктор 2, подключенный через согласующие цепи к генератору токов высокой «частоты». На разброс параметров наращиваемого слоя оказывает значительное влияние газодинамическая обстановка в реакторе. Для реактора горизонтального типа

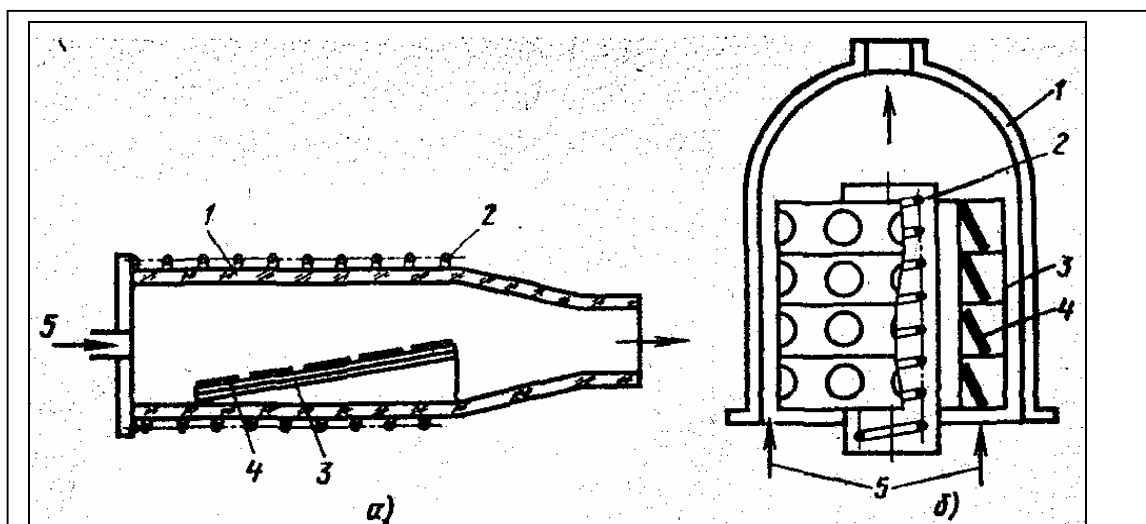


Рисунок.6.1 - Схемы реакторов для газовой эпитаксии

а — горизонтального типа; б — вертикального;

1 — реакционная камера; 2 — индуктор; 3 — подложкодержатель;

4 — подложки; 5 — подача парогазовой смеси

естественная конвекция -направлена перпендикулярно направлению вынужденной конвекции. В этих условиях наблюдается течение газов в виде спиралей или вихрей. В условиях только вынужденной конвекции наблюдается ламинарное течение газовых потоков. Переход от реакторов круглой формы к прямоугольно-эллиптической позволяет увеличить производительность установки и снизить разброс параметров наращиваемого слоя.

Температуру нагревателя измеряют оптическим пирометром, а температуру газового потока на выходе из реактора — хромель-алюмелевой термопарой, введенной в реактор в кварцевом чехле перпендикулярно потоку газа.

Перспективным направлением в конструировании реакторов является создание конструкций с объемным расположением подложек и их двусторонним нагревом, что приближает условия обработки подложек к условиям в изотермических реакторах. Схема реактора с объемным расположением подложек при двустороннем нагреве показана на рис.6.2

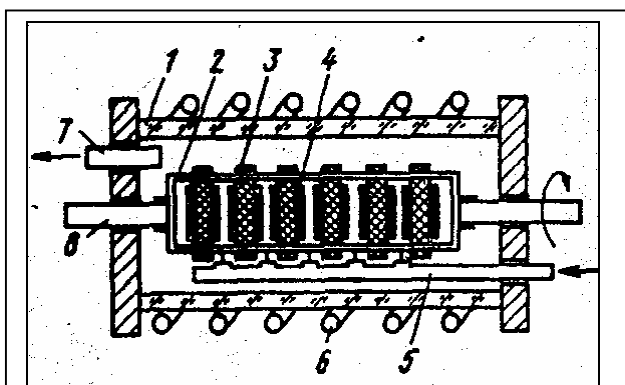


Рисунок 6.2 - Схема реактора с объемным расположением подложек

1 — кварцевый реактор; 2 — стержни; 3 — графитовые диски; 4 — подложки; 5 — коллектор парогазовой смеси; 6 — индуктор; 7 — патрубок для выхода парогазовой смеси; 8 — вал с пакетом подложек

Подложкодержатель представляет собой конструкцию, выполненную из молибденовых стержней 2 (типа «беличьего колеса») и приводимую во вращение. С помощью этих стержней крепят параллельно друг другу графитовые диски 3 толщиной 2,5 мм. Зазор между дисками составляет 7 мм. К каждому графитовому диску с обеих сторон крепят исходные подложки 4 с помощью тонких колец из молибдена или карбида кремния. Различные варианты ввода парогазовой смеси в каждый из зазоров между дисками и формы осаждаемых слоев показаны на рис.6.3. Наиболее равномерный по толщине слой осаждаемого вещества получается при подаче парогазовой смеси через коллектор, качающийся по дуге (рис.6.3,в). Коллектор

представляет собой кварцевую трубку диаметром 13 мм с отверстиями диаметром 2 мм.

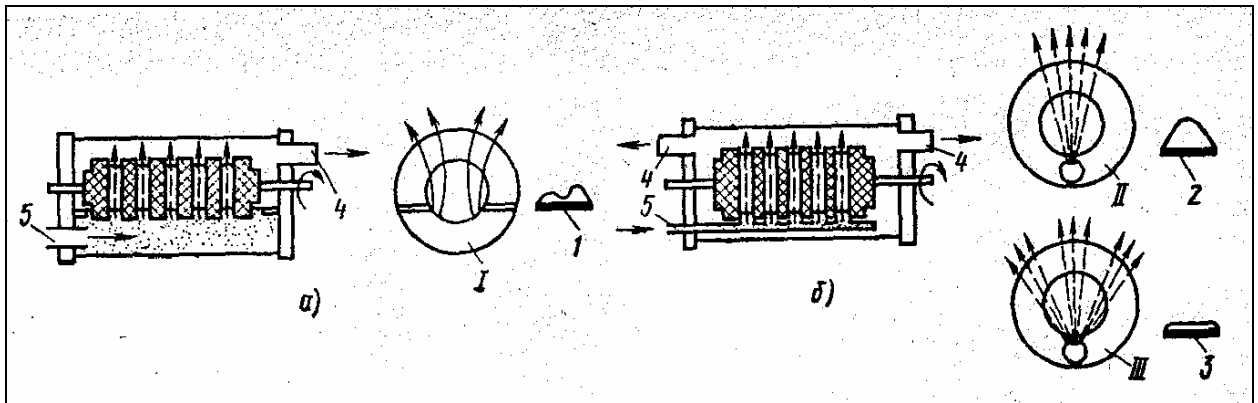


Рисунок 6.3 - Различные варианты ввода парогазовой смеси в реактор: а — через патрубок; б — через коллектор; в — через качающийся коллектор;

Технико-экономические показатели реактора с объемным расположением подложек при их двустороннем нагреве лучше, чем у обычного реактора горизонтального типа. Так, например, для разогрева подложки в реакторе с объемным расположением

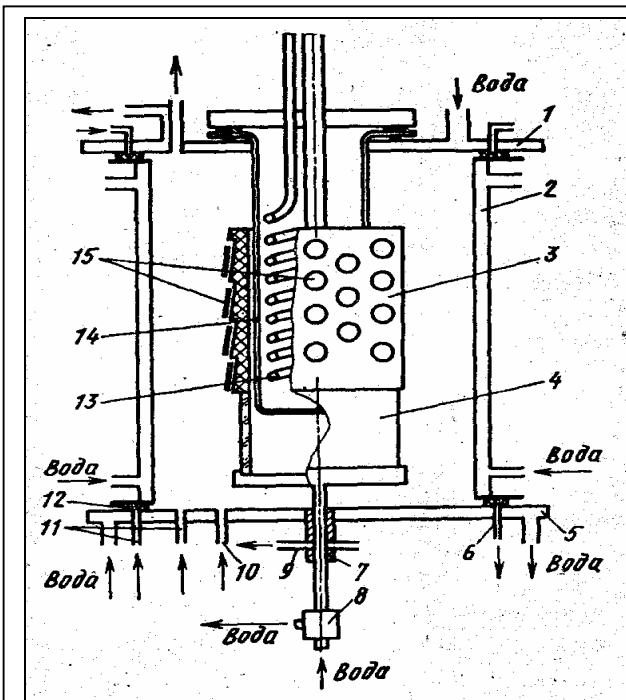


Рисунок 6.4 – Схема цилиндрического промышленного реактора:

верхний фланец; 2 - водоохлаждаемый реактор; 3 - подложкодержатель; 4-подставка; 5 — никелевый фланец; — штуцер ; 7 - манжета вала; 8 —вал вращения; 9 уцер; 10 — штуцер подачи парогазовой смеси; 11 — уцеры подачи водорода; 12 — уплотнение; 13 ->• уктор; 14 — кварцевый стакан; 15 — подложки

расположением подложек до температуры 1100°C требуется 0,5—1,0 кВт вместо 2—4 кВт для других типов реакторов. Эта экономия энергии объясняется уменьшением потерь на излучение при таком расположении подложек. Скорость роста слоев кремния в реакторе с объемным расположением подложек и двусторонним нагревом до 5 мкм/мин вместо 1 мкм/мин в реакторах других типов.

Вертикальный реактор. Вертикальный реактор предназначен для массового производства эпитаксиальных структур с точностью распределения

температуры по подложкодержателю $\pm 3^\circ\text{C}$, разбросом толщины и удельного

сопротивления выращенных слоев в пределах $\pm 10\%$. Для пластин разных ярусов разброс увеличивается. Многоярусный подложкодержатель равномерно вращается со скоростью 3-120 об/мин.

На структуру потока влияет его скорость, условия нагрева, форма подложкодержателя, геометрия реакционных камер и ориентация их в пространстве, организация ввода парогазовой смеси и удаления из камер продуктов реакции.

овления эпитаксиальных структур кремния, а также процессов газового травления подложек и получения покрытий из окисла и нитрида кремния.

Эпитаксиальные установки с горизонтальным реактором проще по конструкции (отсутствуют движущиеся части в реакторе), но отличаются высоким расходом рабочих газов и большим разбросом по толщине и удельному сопротивлению осаждаемых пленок. Установки с вертикальным реактором сложнее по конструкции, но обеспечивают самую высокую производительность и меньший разброс по толщине и удельному сопротивлению осаждаемых пленок.

Реакторы обычно размещают в отдельных шкафах, которые содержат устройства оперативного управления, механизации (подъема, поворота), водоохлаждения и пылезащиты зоны загрузки пластин.

6.2 Тенденции развития оборудования для эпитаксии

В развитии оборудования для газовой эпитаксии можно выделить следующие направления:

- совершенствование условий ввода газовых потоков в реактор;
- повышение стерильности реакционных камер и газовых систем,
- агрегатирование нескольких реакционных камер;
- снижение рабочей температуры процессов;
- создание комплексной системы автоматического управления процессами осаждения с автоматическим контролем и регулированием параметров осаждения с помощью ЭВМ;

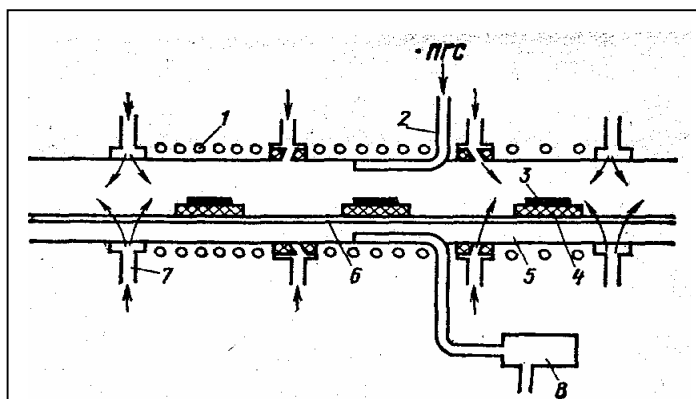


Рисунок 6.5 - Схема установки непрерывного действия для газовой эпитаксии:

1 — нагреватель; 2— коллекторы для подачи и вывода парогазовой смеси (ПГС); 3-подложки; 4— подложкодержатель; 5 — реактор; 6-транспортер; 7 — патрубки для подачи технологических газов; 8 — средство откачки

-разработка конструкций с объемным расположением подложек и их двусторонним нагревом;

-разработка оборудования непрерывного действия.

За последние годы возрос интерес к оборудованию непрерывного действия для процессов эпитаксиального наращивания.

Установка непрерывного действия может представлять собой горизонтальную,

открытую с обоих концов трубу для травления подложек и наращивания эпитаксиального слоя (рис. 101). Труба разделена на несколько температурных и газовых зон, через которые проходят подложки. Газовые барьеры создаются при помощи специальных устройств, четко разделяющих рабочие зоны и поддерживающих заданное направление газовых потоков. Внутрь трубы подается парогазовая смесь, служащая исходным материалом для наращивания эпитаксиального слоя.

Основные проблемы при реализации непрерывного метода — транспортирование изделий в камере, создание надежных газовых затворов между реакционными зонами, устройствами загрузки и выгрузки, обеспечение заданного профиля температур вдоль камеры, выбор материалов для носителей подложки, транспортного устройства и нагревателя для обеспечения минимального примесного фона.

Наиболее приемлемым решением является использование «спутников-носителей» подложек, перемещаемых с помощью транспортных средств или на газовой подушке.

Эффективным направлением повышения производительности и экономической целесообразности использования установок и дорогостоящих производственных площадей является агрегатирование нескольких реакционных камер (УНЭС-2). Одновременное проведение вспомогательных операций и процесса наращивания слоя в двух реакционных камерах, автоматизация и программирование основных операций позволили повысить производительность установки.

6.3. Оборудование для жидкофазной эпитаксии

Метод жидкофазной эпитаксии в последнее десятилетие нашел широкое распространение в технологии полупроводниковых приборов, например при изготовлении люминесцентных и фотоэлектрических приборов на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов или силовых полупроводниковых приборов на кремнии.

Процесс жидкофазной эпитаксии можно разделить на следующие этапы. Полупроводник, легирующая примесь и добавки (растворенные вещества) расплавляются в соответствующем легкоплавком, химически инертном к раствору и подложке веществе, чаще всего в металле (растворитель). Расплав выдерживают при температуре приготовления до полной гомогенизации. После этого раствор-расплав приводится в контакт с подложкой, смачивая ее. После установления теплового равновесия при температуре смачивания возможно в случае необходимости травление подложки за счет подъема температуры и создания ненасыщенного по растворенному веществу расплава или эпитаксиальный рост растворенного вещества на подложку за счет снижения температуры и создания пересыщенного раствора-расплава. Примеси для получения легированных эпитаксиальных слоев вводятся в раствор-расплав во время приготовления шихты до ее расплавления или из газовой фазы. После осаждения эпитаксиального слоя избыточный раствор-

расплав удаляют с подложки, затем подложку с осажденным слоем охлаждают до комнатной температуры.

Современная установка для жидкофазной эпитаксии должна обеспечить:
высокую производительность процесса;

диапазон рабочих температур в реакторе $4504 \div 1573$ К;

проведение процесса в чистой инертной или восстановительной атмосфере с содержанием кислорода менее $1 \cdot 10^{-4}\%$;

программированный автоматический подъем или снижение температуры раствора-расплава со скоростью $0,1—4,0$ К/мин;

контакт свежееобразованной поверхности раствора-расплава, свободной от окисной пленки, с подложками и деконтацию использованного расплава;

длину рабочей тепловой зоны более 500 мм с распределением температуры $\pm 0,25$ °С;

вращение кассеты с подложками в случае вертикального расположения исходных подложек в кассете.

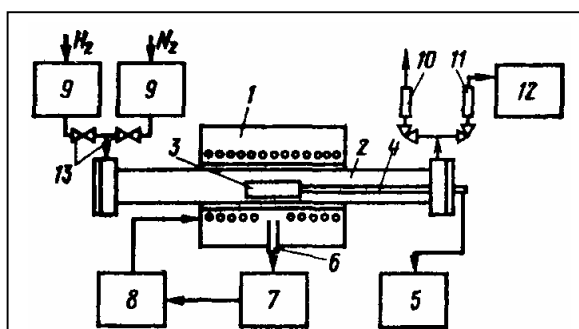


Рисунок 6.6 - Схема установки для жидко-фазной эпитаксии:

- 1 — печь сопротивления; 2 — реактор;
- 3 — кассета для подложек и раствора-расплава; 4 — контрольная термопара;
- 5 — измерительный прибор; 6 — регулирующая термопара; 7 — регулятор мощности; 8 — источник питания;
- 9 — устройство для очистки газов; 10 — гидрозатвор; 11 — азотная ловушка; 12 — вакуумный насос; 13 — вентили.

Установка жидкофазной эпитаксии, схема которой изображена на рис. 103, состоит из камеры или реактора для ограничения рабочего объема, нагревательного элемента (печь сопротивления 1); системы прецизионного контроля и регулирования температуры, системы вакуумирования и газоснабжения; кассеты 3 для размещения подложек и раствора-расплава, устройств для вращения кассеты с подложками или перемещения элементов кассеты.

Наиболее распространенным методом получения эпитаксиальных слоев арсенида галлия из жидкой фазы является кристаллизация из переохлажденных насыщенных растворов в системе открытого типа.

Для арсенида галлия интервал рабочих температур эпитаксии $973—1223$ К. Для арсенида галлия наилучшим растворителем является галлий, обладающий низкой температурой плавления ($302,5$ К), высокой температурой кипения (2510 К) и низким давлением пара ($0,01—0,6$ Па в интервале рабочих температур). Влияние примесей сводится к минимуму, поскольку галлий является компонентом кристаллизуемого соединения. При этом применяют особо чистый галлий. В качестве материала контейнера используют графит, который не омачивается галлием и не растворяется в нем в интервале рабочих температур процесса жидкофазной эпитаксии.

Схема кассеты для разовой загрузки шихты для жидкофазной эпитаксии арсенида галлия приведена на рис.6.7. Процесс жидкофазной эпитаксии

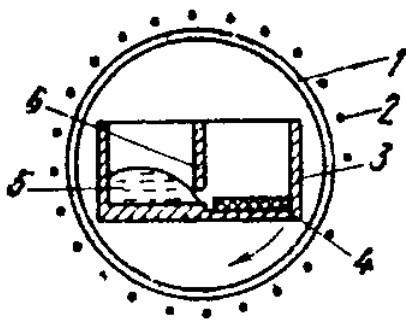


Рисунок 6.7- Схема теплового узла установки для жидкофазной эпитаксии арсенида галлия:

1 — реактор; 2 — нагреватель;
3 — кассета; 4 — подложка; 5 — ячейка для расплава; 6 — перегородка

осуществляется следующим образом. Графитовую кассету с размещенными на ней подложками арсенида галлия и шихтой расплава загружают в трубчатую водородную электропечь, снабженную приспособлением для наклона на требуемый угол. В процессе нагрева до заданной температуры шихта расплавляется. Шихта состоит таким образом, чтобы содержание арсенида галлия в расплавленном галлии было близким к равновесному, взятому из диаграммы состояния при заданной температуре. После небольшой выдержки угол наклона печи изменяют так, чтобы расплав переместился в отделение с подложкой и полностью ее покрыл.

6.4 Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)

МЛЭ первоначально называлась вакуумная эпитаксия. Она происходит в высоком и сверхвысоком вакууме на чрезвычайно чистую подложку, температура которой сравнительно не высока (300 – 500 °С). Кремний испаряется из испарителя и конденсируется на подложке. Нагрев осуществляется электронным лучом или токами ВЧ. МЛЭ отличается малой легкоуправляемой скоростью роста, что способствует формированию чистых и очень тонких пленок.

Оборудование для МЛЭ намного сложнее чем для ГФЭ. Установки для МЛЭ (бывают однокамерные и многокамерные) состоят из следующих частей:

- рабочая камера со средствами откачки
- узел формирования молекулярных пучков
- устройство для прецизионной очистки подложки (ионная, термическая)
- прецизионный манипулятор для загрузки подложек в вакуумную камеру, юстировки их положения и выгрузки
- микропроцессор
- система контроля (ЭОС, ВИМС, ДБЭ, рентгеноэлектронная спектроскопия)

Процесс откачки длится 20 – 48 часов, обезгаживание проходит при температуре 250 – 400 °С.

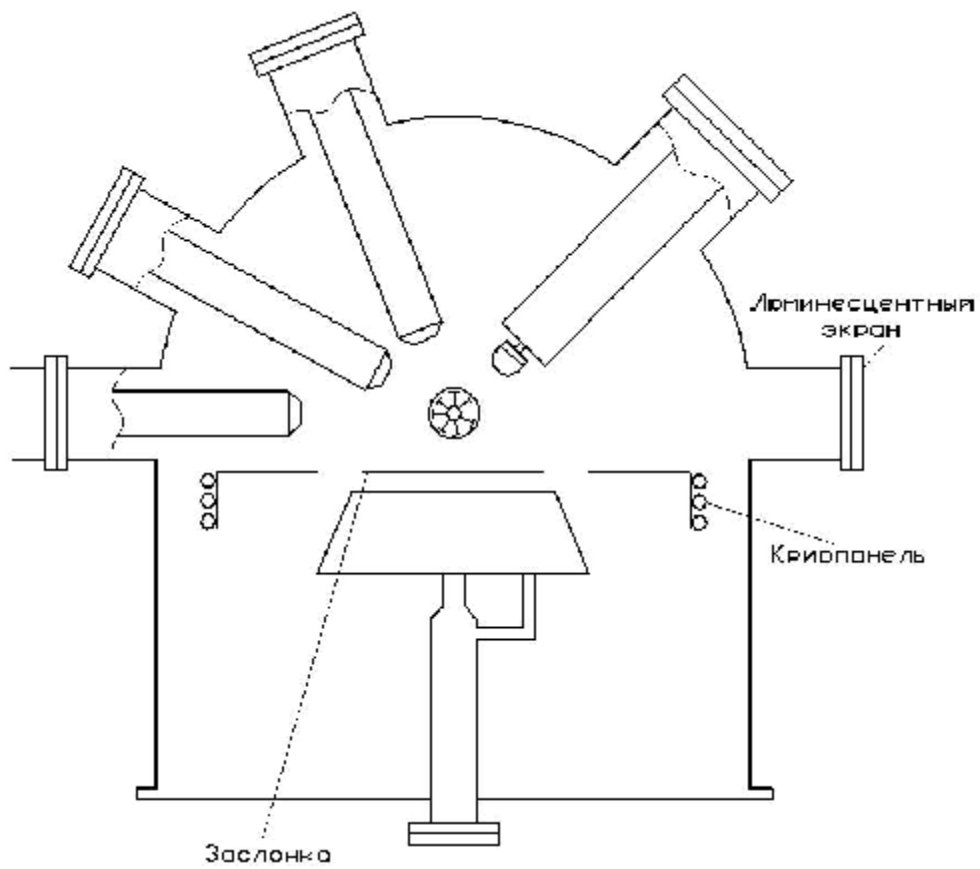


Рисунок 6.8 – Установка для молекулярно-лучевой эпитаксии

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ И ДИФФУЗИИ

Термические процессы являются важнейшими в технологии полупроводникового производства. Основными из них являются окисление и диффузия. Для получения полупроводниковых приборов с воспроизводимыми и стабильными параметрами необходимо, чтобы в диффузионных и окислительных установках поддерживалась заданная температура с высокой степенью точности, в том числе по всей рабочей длине канала печи и в течение длительного времени. В современном оборудовании температура поддерживается с точностью $\pm 0,5^0$ С при длине 600-700 мм с помощью автоматических систем терморегулирования. Системой автоматического регулирования называют устройство, управляющее по определенному закону одним или несколькими параметрами технологического процесса. В термических установках производства полупроводниковых приборов и микросхем применяют автоматические электронные системы стабилизации и программного регулирования температуры.

Системы автоматического регулирования температуры обычно разрабатываются по единой структурной схеме (рис.7.1) и состоят из задатчика З, устройства сравнения УС, чувствительного элемента (датчика) ЧЭ, объекта регулирования ОР исполнительного устройства ИУ и усилителя У. Задатчиком (уставкой) устанавливают в термической установке требуемый уровень температуры, который должен поддерживаться системой автоматически. Чувствительный элемент (например, термоэлектрический преобразователь - термопара), находящийся в термической установке - объекте регулирования, измеряет действительное значение температуры и подает сигнал в устройство сравнения. Этот сигнал сравнивается с заданным и в результате вырабатывается сигнал рассогласования. Усилитель преобразует сигнал рассогласования в управляющий сигнал требуемого вида и мощности, который воздействует на исполнительное устройство, регулирующее подачу электроэнергии. При этом система приходит в равновесие, и сигнал рассогласования становится равным нулю.

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

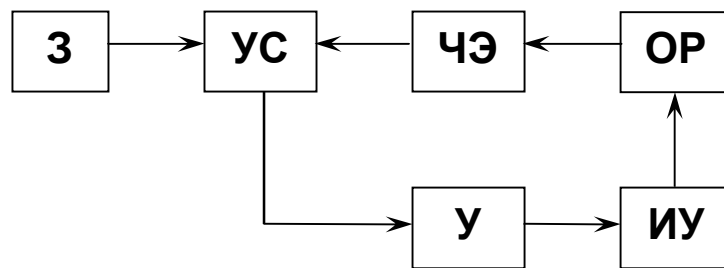


Рисунок 7.1 - Структурная схема системы автоматического регулирования

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

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

Для изменения мощности термических установок чаще других используют двухпозиционное регулирование, при котором они периодически включаются на номинальную мощность, а затем полностью отключаются. Изменяя время включения и отключения, можно плавно в широких пределах изменять среднюю мощность, а, следовательно, температуру нагрева. Иногда применяют трехпозиционное регулирование, при котором дополнительная ступень позволяет включать установку на полную или частичную мощность. Широкое использование позиционного регулирования объясняется его простотой. Но оно обладает низкой точностью поддержания заданной температуры и поэтому не может применяться, например, в диффузионных термических установках, точность поддержания температуры в которых должна быть $\pm 0,5^\circ\text{C}$ по длине канала 600 мм.

По принципу действия системы регулирования бывают непрерывные и дискретные (релейные и импульсные). Каждый элемент систем регулирования непрерывного действия воздействует на другие постоянно, т.е. выходной сигнал является непрерывной функцией рассогласования на выходе регулятора. В релейных системах регулирования положение исполнительного органа зависит не от значения сигнала рассогласования, а от его

знака. В импульсных системах выходной сигнал регулятора представляет собой последовательный ряд импульсов, амплитуда, длительность или частота которых зависят от сигнала рассогласования.

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

Регуляторы пропорционального действия (П-регуляторы) имеют жесткую связь между входным и выходным сигналами, т.е. между отклонением температуры и приращением подводимой к установке мощности (ΔP). Каждому значению отклонения температуры (рассогласования Δt) соответствует единственное значение подводимой мощности. Идеальный П-регулятор не имеет инерции. При скачкообразном изменении температуры Δt в момент времени τ_1 мгновенно возникает соответствующее изменение мощности, как это видно из динамической характеристики (рис.7.2, а), которое соответствует произведению коэффициента усиления K_p на рассогласование Δt . Единственным настраиваемым параметром П-регуляторов является коэффициент усиления K_p .

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

Жесткая связь между входным и выходным сигналами П-регуляторов при работе установок, имеющих резистивный нагрев, с ерзания температуры на заданном уровне, что является их недостатком.

Регуляторы интегрального действия (И-регуляторы) не имеют определенной зависимости между отклонением значения регулируемого параметра и его выходного значения. Другими словами, можно сказать, что И-регуляторы изменяют подводимую мощность со скоростью, пропорциональной отклонению регулируемой температуры от заданной. Из динамической характеристики И-регулятора (рис.7.2,б) следует, что пока происходит изменение температуры Δt_1 выходной сигнал увеличивается и через единицу времени будет равен произведению температуры рассогласования Δt на коэффициент усиления по скорости K_v , являющийся единственным параметром настройки регуляторов данного типа.

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

резистивными нагревателями И-регуляторы из-за низких динамических свойств не применяют.

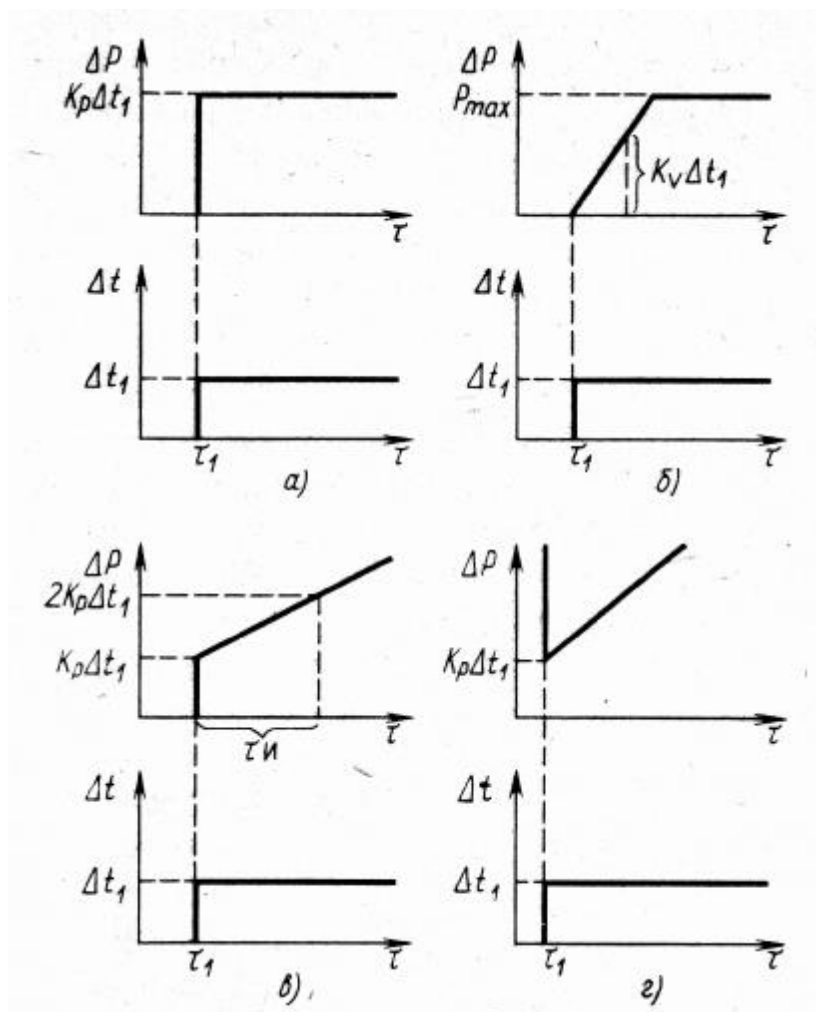


Рисунок 7.2 - Динамические характеристики П-регулятора (а), И-регулятора (б), ПИ-регулятора (в), ПИД-регулятора (г)

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

Регуляторы пропорционально-интегрального действия — изодромные (ПИ-регуляторы) совмещают П- и И-регулирующие воздействия. Параметрами настройки этих регуляторов являются коэффициенты усиления по мощности K_p и по скорости K_v . Из динамической характеристики ПИ-регулятора (рис.7.2, в) видно, что при постоянной температуре рассогласования Δt_1 через время изодрома (удвоения), равное $\tau_{и}$, входной сигнал становится пропорциональным мощности. Время изодрома

характеризует степень введения в закон регулирования интегрального воздействия. Интегральная часть регулятора делает связь между температурой и мощностью гибкой, изменяющейся во времени в зависимости от значения и длительности сигнала рассогласования.

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

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

Динамическая характеристика ПИД-регулятора, представляющего собой систему из трех параллельно включенных звеньев — пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего, показана на рис.7.2,г. При введении воздействия регулятор учитывает тенденцию в отклонении, оценивает значимость вносимого возмущения до возникновения большого рассогласования и в соответствии с этим заранее выполняет регулирование, что способствует уменьшению динамического отклонения регулируемого параметра, снижению колебательности системы и времени регулирования.

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

Термическое оборудование для процессов окисления и диффузии

Однозонная трехканальная термическая установка (рис.7.3), предназначенная для выполнения термических процессов диффузии и окисления в газовом потоке открытого рабочего канала на полупроводниковых пластинах, состоит из четырех мастей: электропечи 3, устройства газораспределения 1, камеры 9 загрузки-выгрузки и измерительного стенда 7. Камера загрузки-выгрузки и измерительный стенд являются отдельными изделиями и поставляются по желанию заказчика.

Электропечь 3 имеет основание для нагревательных камер 6, систему терморегулирования и теплообменник 5. Основанием электропечи служит металлический сварной каркас, представляющий собой две боковые рамы, которые для жесткости связаны снизу болтовым соединением между собой и с приборным основанием, а сверху - с корпусом теплообменника. Над

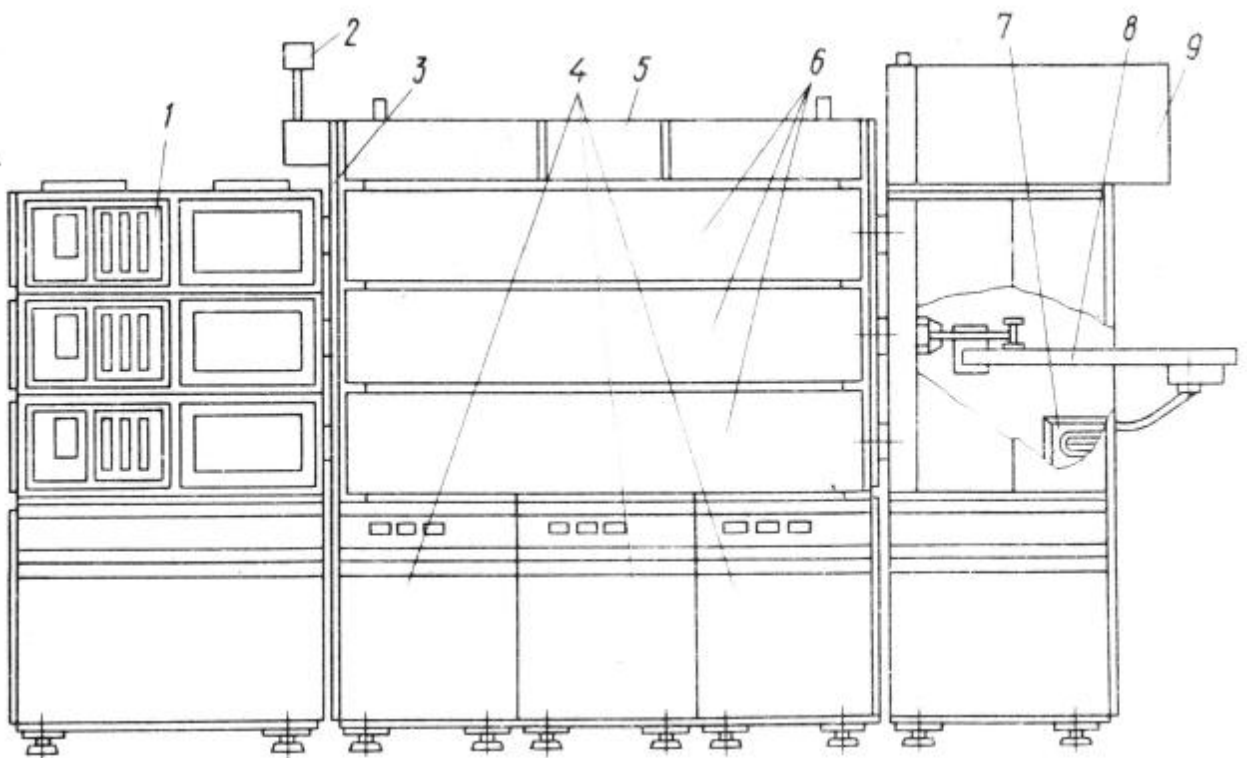


Рисунок 7.3 - Однозонная трехканальная термическая установка
 1 – устройство газораспределения, 2 – сигнальная лампа, 3 – электропечь, 4 – шкафы приборных оснований, 5 – теплообменник, 6 – нагревательные камеры, 7 – измерительный стенд, 8 – механизм перемещения термопары, 9 – камера загрузки-выгрузки.

приборным основанием расположены одна над другой три нагревательные камеры 9. Приборное основание состоит из трех сварных металлических шкафов 4, в каждом из которых размещены системы управления и регулирования температуры, а также блок питания нагревательных камер 6.

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

Пусковое программное устройство выполнено в виде выдвижного шасси, на передней панели которого размещены органы управления (сигнальные лампы, кнопочные переключатели, вольтметры), а внутри — реле времени, потенциометры-задатчики с цифровыми счетчиками,

предохранитель, коммутационное реле, счетчики времени выработки и элементы коммутации.

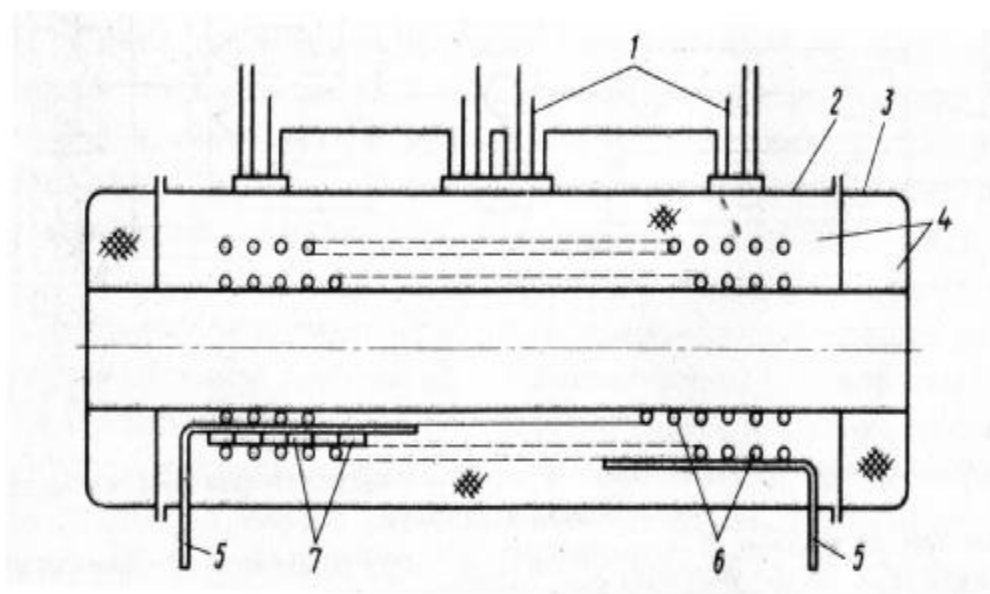


Рисунок 7.4 - Нагревательная камера термической установки

1 – термопары, 2 – кожух, 3 – алюминиевая крышка, 4 – керамическое волокно, 5 – токопроводы, 6 – внутренняя и наружная спирали, 7 – керамические изоляторы

Нагревательные камеры (рис.7.4) имеют цилиндрическую форму. Нагревательный элемент представляет собой две соосно расположенные спирали 6 из материала высокого удельного сопротивления, соединенные между собой параллельно; но разделенные токопроводами 5 и системой питания на три самостоятельные секции. Снаружи нагревательный элемент теплоизолирован прессованным керамическим волокном 4 и закрыт алюминиевым кожухом 2, на котором по краям и в центре расположены коробки для крепления регулирующих и контрольных термопар 7 соответственно с градуировкой ПР30/6 и ПП1.

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

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

В термической установке применена трехканальная независимая система регулирования температуры (рис.7.5). На примере центральной секции 4 нагр-

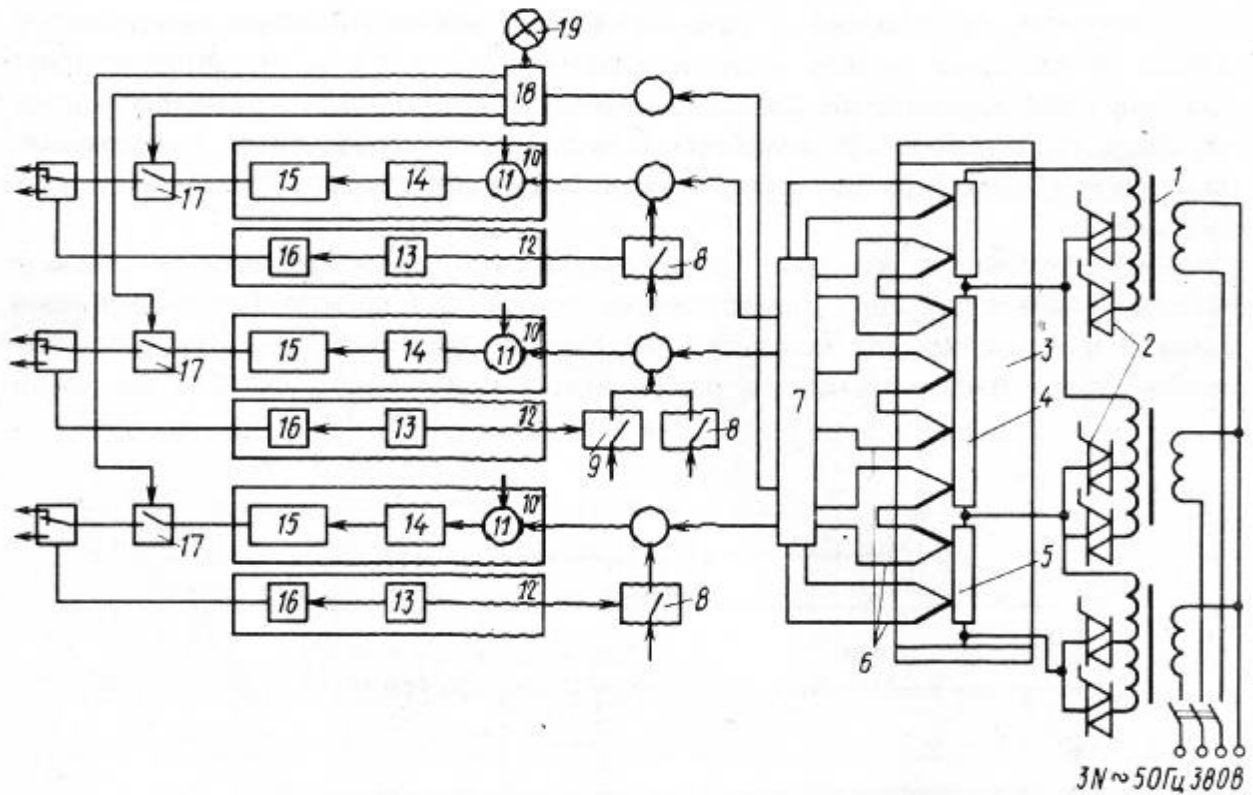


Рисунок 7.5- Функциональная схема автоматической системы регулирования температуры термической установки:

1 – силовой трансформатор, 2 – симисторы, 3 – нагреватель, 4,5 – центральная и краевая секции, 6, 7 – термопары и блок стабилизации их холодных концов, 8, 9 – потенциометры-задатчики, 10 – регулятор температуры, 13 – реле времени, 14 – усилитель постоянного тока, 15 – функциональный усилитель мощности, 16 – цепь задержек, 19 – сигнальная лампа.

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

рассогласования (сигнала) поступает на высокочувствительный усилитель постоянного тока 14, усиливается, далее еще раз усиливается функциональным усилителем мощности 15 и дважды преобразуется сначала в сигнал управления по пропорционально-интегральному закону, а затем в фазоимпульсный сигнал управления. В зависимости от этого сигнала изменяется приоткрытие кремниевых управляемых симметричных вентилях (симисторов) 2, включенных во вторичную обмотку силового трансформатора 7, и в результате уменьшается или увеличивается мощность, подаваемая в центральную секцию 4 нагревателя 3.

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

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

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

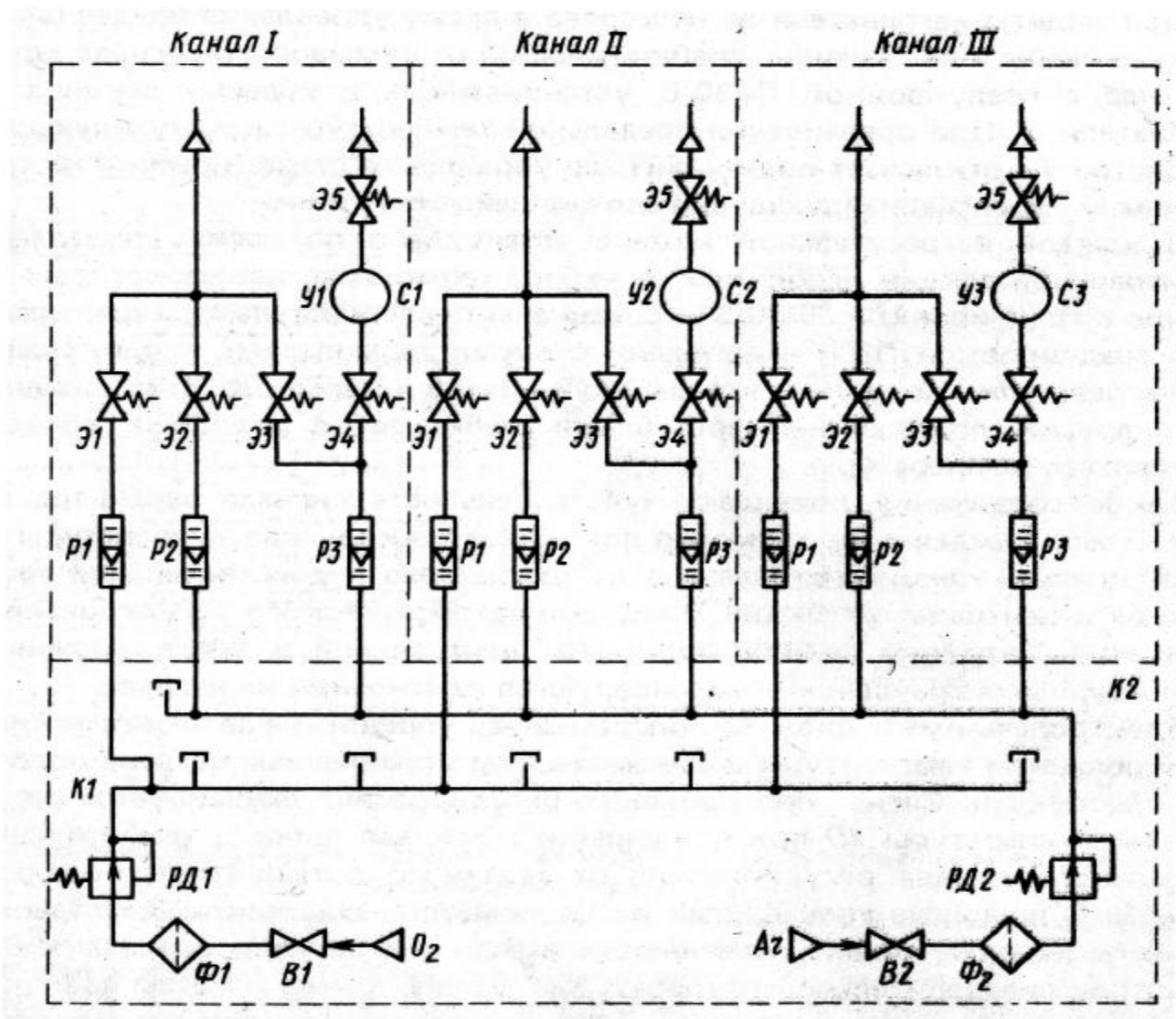
Электродогреватель имеет блок 12 программного управления автоматическим регулированием температуры и динамическим управлением нагрева лодочки с пластинами. Сигнал программного регулирования формируется регулятором температуры 10 при отклонении термо-ЭДС датчика температуры центрального канала регулирования от заданного потенциометром-задатчиком 9. С помощью трех других потенциометров-задатчиков 8, установленных в каждом канале, изменяются параметры регулирования в зависимости от предварительной температуры нагрева, длины и массы лодочки с пластинами. Программирование выполняется реле времени 13, которое коммутирует цепи на входе в основную систему регулирования и цепи задержек 16, переключающие выходной сигнал регулятора температуры 10 на включение силового блока питания в соответствующий режим.

При работе установки в зону с постоянной температурой вводят кварцевую подставку-лодочку с полупроводниковыми пластинами, прогревают ее и подают в рабочий канал парогазовую смесь, которая, перемещаясь, омывает полупроводниковые пластины, частично осаждающаяся на них. Когда заданное время термообработки истечет, подачу парогазовой смеси прекращают и извлекают лодочку с пластинами из рабочего канала

электropечи. Такую термообработку применяют, если лодочки с пластинами находятся в рабочем канале в течение нескольких часов (длительный процесс). В этом случае время переходных процессов мало и не отражается на качестве термообработки пластин.

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

Устройство газораспределения (рис.7.6) имеет основание в виде стального металлического каркаса, на котором размещены три шкафа по одному на каждый канал электropечи и может подключаться к вытяжной



системе. Внутри

Рисунок 7.6 - Схема устройства газораспределения термической установки

каркаса находятся по два вентиля, фильтра, реле давления и распределительных коллектора, которые предназначены для подачи кислорода и аргона в электropечь. Каждый шкаф разделен на два отсека, в одном из которых установлен термостат с увлажнителем или микрохоло-

дильник со смесителем, а в другом — контрольно-запорная газовая арматура и система автоматического регулирования температуры и питания. Все элементы устройства газораспределения изготовлены из фторопласта, полиэтилена и нержавеющей стали, т.е. материалов, не подверженных коррозии.

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

При создании оксидной пленки на полупроводниковых пластинах, например в канале I электропечи, кислород из магистрали проходит через вентиль В1, фильтр Ф1, реле давления РД1, коллектор К1, ротаметр Р1, электромагнитные клапаны Э1, Э3, Э4, увлажнитель У1, электромагнитный клапан З5 и далее парогазовая смесь подается в канал электропечи. Аналогичен путь аргона, но вместо увлажнителя он должен пройти смеситель С1 с диффузантом, например бромистым бором (BBr_3) или фосфорным ангидридом (P_2O_5).

Камера загрузки—выгрузки, как уже отмечалось, являясь дополнительным оборудованием, изготавливаемым по специальному заказу применительно к конкретному типу термической установки, предназначена для создания обеспыленной атмосферы при проведении термических процессов. На рис. 7,а-в показаны три схемы камер загрузки - выгрузки с горизонтальным и вертикальным и сверху вниз и снизу вверх ламинарным потоком воздуха.

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

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

На смену автономному термическому оборудованию пришли поточные линии АПЛ-Д-18-100 и АПЛ-Д-24-100, предназначенные для комплексного выполнения процессов окисления и диффузии с высокой точностью поддержания режимов и автоматизацией основных операций. Эти линии имеют соответственно 18 и 24 реактора (канала), служащих для одновременной термической обработки помещенных в кассету 100 полупровод-

никовых пластин диаметром до 100 мм. Линии монтируются в пылезащитном коридоре с содержанием менее 3500 пылинок размером 0,5 мкм в 1 м³ воздуха. Загрузка полупроводниковых пластин в термические реакторы и выгрузка из них производятся в этом коридоре. Реакторы могут располагаться относительно центрального пульта управления справа или слева.

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

Две трехканальные диффузионные однозонные термические установки 02ДОМ-75-001 оборудованы устройством газораспределения УГ-2 и в комплекте с системой пылезащиты представляют собой агрегат АДС-6-100. Таких агрегатов в линии может быть несколько, и каждый из них имеет свою систему управления, связанную с ЭВМ, что позволяет корректировать технологические режимы диффузии и окисления в зависимости от отклонения их параметров. Устройство газораспределения служит для подготовки газовой смеси и ее автоматической подачи по заданной программе в реактор при окислении и диффузии (загонке и разгонке).

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

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

Основные технические данные и характеристики системы СДО-3/125-015

Система предназначена для производства изделий электронной промышленности при выполнении комплекса операций диффузии, окисления и других прецизионных процессов физико-термической обработки полупроводниковых пластин диаметром не более 100 мм, с автоматизацией

операций загрузки и выгрузки пластин в диффузионный реактор, с плавной регулировкой скоростей загрузки и выгрузки .

Система изготовлена в исполнении УХЛ категории 4.2 ГОСТ 15150-69 и предназначена для работы при температуре от +10 до +35 °С, относительной влажности от 65 до 80 % и атмосферном давлении от 86,66 до 106,66 кПа .

Для эксплуатации системы ее необходимо подсоединить к системе вытяжной вентиляции , имеющей электрическую блокировку по цепи питания системы , с расходом воздуха не менее 0,26 м/с (950 м/ч).

Питание системы от 4-х проводной с нулевым проводом сети переменного тока , напряжением 380/220В частоты 50 Гц. Нормы качества электрической энергии по ГОСТ 13109-67. Для эксплуатации системы в нее необходимо подавать напряжение питания, газы и воду. Емкость партий пластин в каждом реакторе 100 шт. Электрическая мощность, потребляемая системами при различных режимах должна быть не более значений, указанных в табл.7.1 .

Таблица 7.1 - Энергетическая мощность установок

Обозначение модели	Мощность, кВА, при	
	режиме разогрева электропечи	режиме поддержания рабочей температуры в электропечи
СДО-3/125-015	100	50

Основные параметры системы приведены в табл.7.2

Таблица 7.2 – Основные параметры системы СДО-3/125-015

Наименование параметров	Допустимые значения по ТУ
Максимальное значение рабочего хода автоматического устройства загрузки АУЗ-4 не менее, мм	1875
Скорость перемещения изделия в зоне реактора минимальная -, м/с максимальная - не менее, м/с	$1,66 \cdot 10^{-3}$ - 10% $1 \cdot 10^{-2}$
Длина рабочей тепловой зоны при статическом режиме в реакторе электропечи с отклонением температур не более ± 0.5 °С, не менее, мм	800
Система обеспечивает внутри объема рабочей тепловой зоны диапазон измерения температур, °С	700-1250
Нестабильность поддержания температуры по опорной точке в пределах длины рабочей тепловой зоны при статическом режиме в реакторе (среднеквадратическое отклонение) в течении 24 ч, не более, °С	0,25
Время разогрева электропечи до максимальной рабочей температуры с учетом установления теплового режима, не	2

более, ч	
Устройство газораспределения обеспечивает максимальный расход пара в количестве не менее кг/с (г/ч)	$16,6 \cdot 10^{-5}$ (600)
Нестабильность поддержания температуры диффузанта в диапазоне +35...+ 70 °С за 8 ч не более, °С	+ - 0,5
Наработка на отказ не менее, ч	320
Коэффициент готовности, не менее	0,97
Средний срок службы до списания , Тсл, не менее, лет	6

Основой работы системы является автоматическая доставка кварцевых кассет с уложенными в них пластинами диаметром не более 100 мм от рабочей площадки модуля загрузки до загрузки в рабочую зону диффузионного реактора печи. Загрузку кассет в реактор осуществляет специальный механизм с помощью кварцевого толкателя, который в зоне реактора находится в зацеплении с кассетой. Во время процесса диффузии в реакторе осуществляется возвратно-поступательное движение кассеты с толкателем, чтобы избежать приварки кассеты к реактору. Реактор со стороны модуля загрузки закрыт заслонкой, которая поднимается в момент загрузки кассет в реактор, а затем снова опускается. Выгрузка кассеты из реактора производится в обратном порядке.

Оперативное управление системой осуществляется оператором с помощью пульта управления загрузкой, блока управления загрузкой и пульта программного управления.

Оборудование для ионной имплантации

В настоящее время технология ионной имплантации получает широкое распространение в производстве СБИС. Наряду с совершенствованием существующих техпроцессов усиливается тенденция использования ионной имплантации в новом качестве. К таким областям нового применения метода можно отнести локальное окисление или нитродизацию кремния для создания межкомпонентной изоляции, формирование скрытых д/э и проводящих слоев, геттерирование примесей на дефектах, стимулирование травления диэлектрических и поликристаллических слоев, радиационно-стимулированная диффузия, ионно-пучковый отжиг легированных слоев, литографию.

Все это повышает требования к системам ионной имплантации, разработкой которых в настоящее время занимаются ведущие фирмы.

Чтобы осуществить процесс ионной имплантации необходимо:

- ионизировать рабочее вещество;
- сообщить иону необходимую энергию;
- отфильтровать ненужные ионы;
- сфокусировать ионный пучок;
- направить ионный пучок на подложку.

Современные системы ионной имплантации содержат, как правило, следующие устройства:

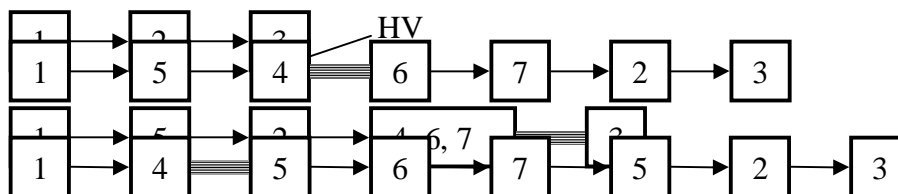
- ионный источник для ионизации рабочего вещества;
- экстрагирующая и фокусирующая оптика;
- сепаратор масс;
- ускорение пучка ионов;
- сканирование ионного пучка;
- приемная камера;
- вакуумная система;
- устройства контроля и управления;
- блоки питания.

По компоновке основных конструктивных элементов установки ионной имплантации можно разделить на 3 группы (рис.8.1):

I.



II.



III.

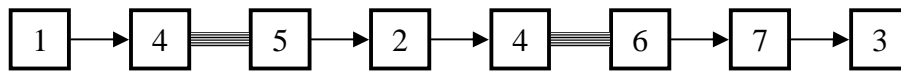


Рисунок 8.1 – Компоновка установок ионной литографии

1 – ионный источник; 2 – приемная камера; 4 – ускоритель; 5 – система фокусировки; 6,7 – устройства сканирования.

Системы, относящиеся к I-й группе, осуществляют ускорение уже отсепарированного пучка. Это позволяет значительно снизить габариты и мощность магнитной системы. Эти системы предназначены для работы с пучками $E > 100$ кэВ

Системы II-й группы имеют ускоритель, расположенный между источником и сепаратором, т.о. работают в режиме ускорения несепарированного пучка. Поэтому такие системы используются для работы с энергиями < 100 кэВ.

К III-й группе можно отнести установки с комбинированным ускорением как несепарированного, так и сепарированного ионного пучка.

8.1 Ионные источники

Источник ионов является одним из наиболее существенных узлов, т.к. характеристики ионных источников в большей степени, чем характеристики остальных функциональных узлов определяют технологические возможности и эффективность работы системы в целом.

Требования к ионным источникам:

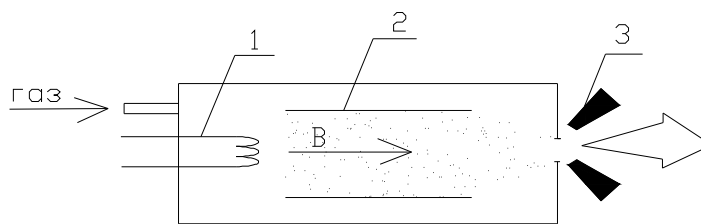
- возможность генерирования однородного высокоинтенсивного ионного пучка со стабильными во времени параметрами;
- возможность получения двухзарядных ионов с высоким выходом;
- получение предельной плотности ионного пучка при максимально низких экстрагирующих напряжениях;
- возможность ионизации как газообразных (BF_3 , BCl_3 , AlCl_3 , AsF_3 , PCl_3 , O_2 , N_2 и т.д.), так и твердых диффузантов;
- возможность легкой замены легирующего элемента;
- возможность первичной фокусировки ионного пучка заданной формы;
- простота управления;
- высокое время наработки на отказ.

Естественно, что удовлетворение всех перечисленных выше требований в одном источнике невозможно. Поэтому в системах ионной имплантации используется ряд разнообразных источников.

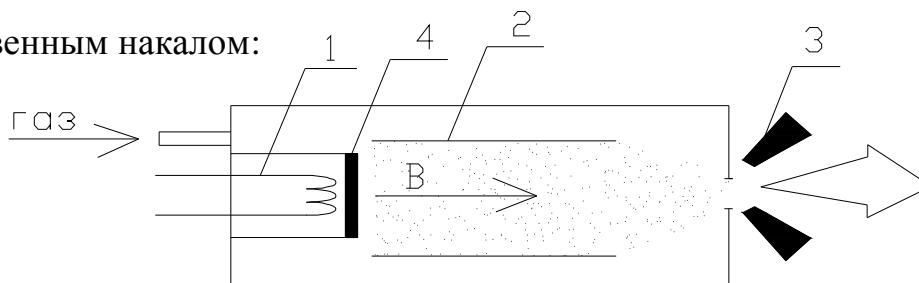
Источники с горячим катодом

Прямого накала:

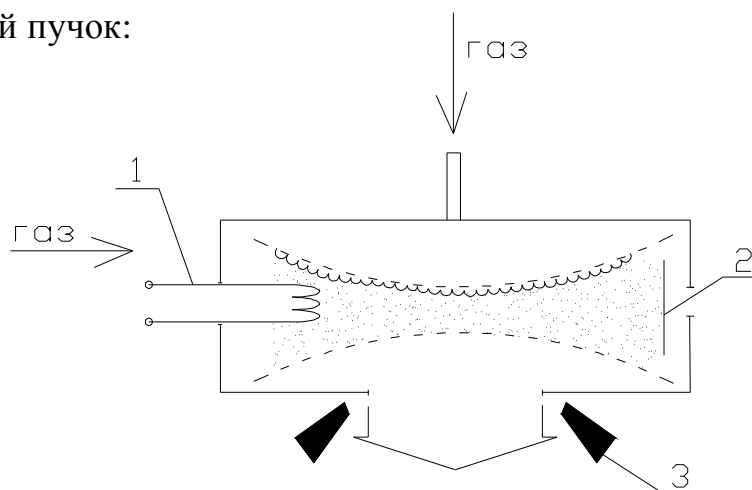
- 1 – катод;
- 2 – анод;
- 3 – экстрактор.



С косвенным накалом:



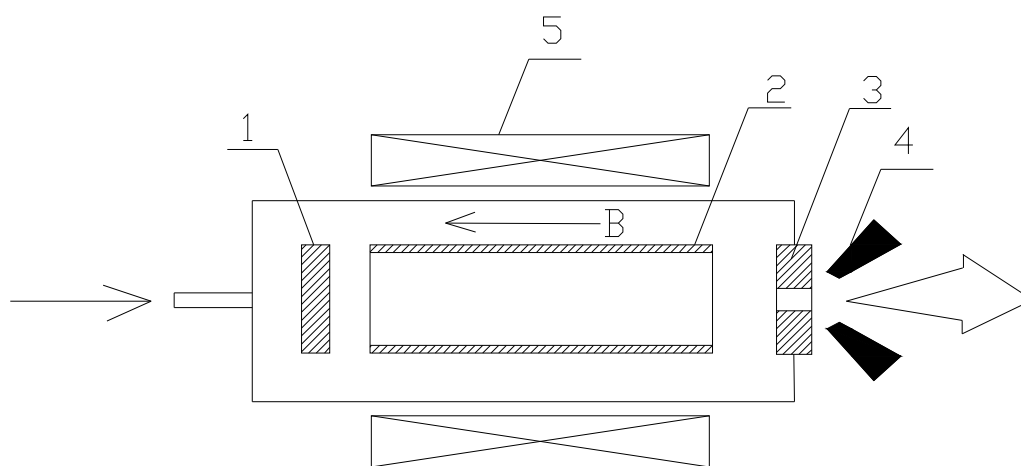
Ленточный пучок:



Как видно из рисунков, источники содержат разрядную камеру, источник электронов, анод, магнитную систему, экстрактор и электроды первичной фокусировки. Часть экстрактов является одновременно и первичным ускорителем, систему подачи рабочего вещества.

Рабочее давление составляет $1,3 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$ Па, плотность ионов $10^{12} - 10^{14}$ см⁻³, напряжение на аноде ~ 100 В.

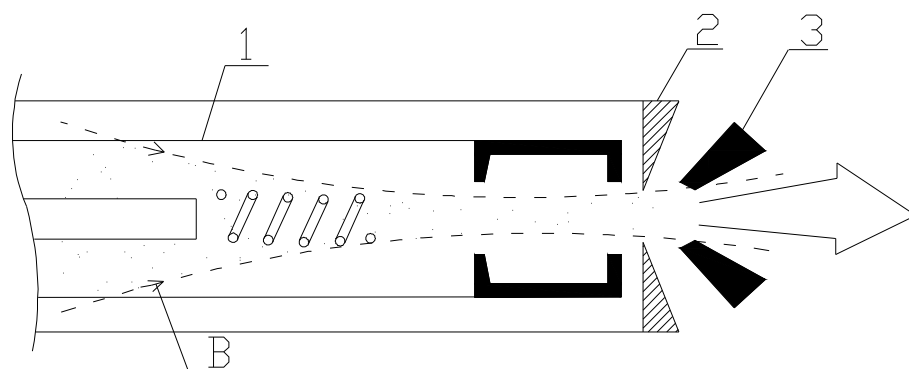
Источник с холодным катодом (Пеннинга)



- 1 – катод;
- 2 – анод;
- 3 – антикатод;
- 4 – экстрактор;
- 5 – электромагнит.

Первичная эмиссия электронов возникает под действием сильного электрического поля вблизи катода с небольшого участка, который может перемещаться по поверхности катода. При этом плотность электронов может достигать 10^6 А/см². После зажигания разряда в процессе ионизации принимают и вторичные электроны, выбитые с катода.

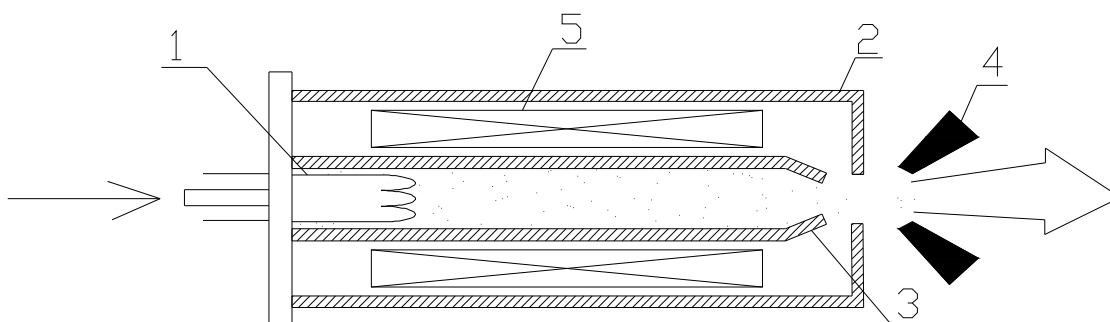
Источник с полым катодом



- 1 – полый катод;
- 2 – анод;
- 3 – экстрактор.

Особенностью является использование катода с внутренней полостью, наличие которой, а также магнитного поля высокой напряженности позволяет создавать внутри полого катода ловушку для энергетических электронов, что приводит к образованию в этом месте плазмы с повышенной плотностью.

Ионный источник дуоплазмотронного типа



- 1 – катод;
- 2 – анод;
- 3 – промежуточный электрод;
- 4 – экстрактор;
- 5 – э/магнит.

Дуаплазмотрон отличается от источника с горячим катодом тем, что за счет создания в зоне экстрагирующего (промежуточного) электрода неоднородного магнитного поля (магнитной линзы) и специальной конфигурации самого электрода происходит существенное сжатие плазмы в относительно небольшой

Система ионно-пучкового транспорта

Должна обеспечивать:

- заданную энергию ионов;
- заданную интенсивность пучка (плотность ионного тока);
- стабильность ионного тока во времени и по площади подложки;
- высокую изотропную чистоту пучка.

Включает в себя:

- ускоритель ионов;
- устройства фокусировки;
- масс-сепаратор;
- системы сканирования ионного пучка.

Требования к ускорителю ионов:

- минимальная потребляемая мощность;
- компактность;
- возможность дополнительной фокусировки пучка;
- минимальное рассеяние и загрязнение пучка;
- исключение пробоев между элементами ускорителя;
- эффективная защита от рентгеновского излучения и высокого напряжения.

Существуют две базовые конструкции ускорителей – одно- или двухпролетные ускорители и ускорительные колонны с постоянным градиентом потенциала. Ускоритель первого типа имеет простую конструкцию, небольшие размеры, но работает только с низкими до 100кЭВ ионами. Electrodes изготавливаются из нержавеющей стали или титана. В качестве изолятора применяют тугоплавкое стекло “пирекс” и свинцовую резину для защиты от рентгеновского излучения.

Фокусирующие системы

При малых энергиях ионов или больших токах ионного пучка из-за эффекта объемного заряда происходит расплывание ионного пучка. В свободном от поля пространстве ионный пучок может захватывать возникающие на его пути медленные электроны или отрицательные ионы, которые могут нейтрализовать объемный заряд.

Фокусировку ионного пучка производят электродами, расположенными в различных местах ионного тракта. В низкоэнергетических установках ускорение и фокусировку часто совмещают. Для фокусировки используют трехэлектродные или квадрупольные линзы.

Масс-сепаратор

Должен обеспечивать:

- сепарирование в широком диапазоне масс с высоким разрешением;
- минимальную аберрацию пучка;
- сохранение формы пучка;
- минимальное загрязнение пучка продуктами распыления стенок сепаратора при бомбардировке их отклоненными ионами.

В настоящее время используются три метода сепарирования:

- по массам с отклонением пучка с помощью магнитов;
- по скоростям без изменения направления пучка с применением скрещенных E и B полей;
- по массам с сепарацией ВЧ-фильтром.

При первом методе применяют магниты различной конфигурации. Наиболее простым и удобным по конструкции является сепаратор с однородным полем, создаваемым секторным магнитом.

Сепарирование ионов различной массы заключается в воздействии на движущиеся ионы силы Лоренца, при этом ионы движутся по круговой траектории, радиус которой зависит от массы иона, ускоряющего напряжения, напряженности магнитного поля и зарядового состояния иона.

Т.о., ионы одинаковых энергий и зарядового состояния будут двигаться по разным траекториям. Угол секторного магнита может быть $60, 65, 90^\circ$. Секторные масс-сепараторы выполняют также функции фокусировки.

Во втором методе используют $E \times B$ сепараторы, представляющие собой ионно-оптические устройства с взаимно перпендикулярными электрическими и магнитными полями.

В таком сепараторе электрическое поле E используют для компенсации воздействия на ион силы Лоренца. При определенных значениях магнитного и электрического полей при некоторых скоростях V_0 выполняется соотношение $HeV_0 = eU$, тогда ионы с массой M_0 проходят через сепаратор по прямой линии. Ионы с массой $M = M_0 \pm \Delta M$ будут испытывать действие отклоняющей силы. Достоинствам $E \times B$ сепаратора являются малые габариты и масса, простота, прямолинейность ионного тракта

ВЧ-сепараторы сложны по конструкции и требуют мощных ВЧ-источников питания. Поэтому они применяются редко.

Системы сканирования ионного пучка

Применяют три вида сканирования:

- механическое, при котором ионный пучок неподвижен, а подложки перемещаются в вертикальном и горизонтальном направлениях;

- электростатическое – сканирование пучка в двух направлениях по поверхности неподвижной подложки;
- смешанное – подложки перемещаются в одном направлении, а пучок в другом.

Механическое сканирование осуществляется каруселью или другими механизмами. Достоинство этого метода—постоянство угла падения ионного пучка на поверхность подложки; недостаток – сложность механизма для перемещения подложки, наличие подвижных частей, требующих смазки.

Электростатическое сканирование применимо в широком диапазоне энергий ионов. Этот метод обеспечивает высокую однородность легирования и эффективен при индивидуальной обработке подложек.

Приемная камера

Предназначена для:

- размещения подложек;
- нагрева и охлаждения подложек;
- ориентации подложек;
- смены подложек.

Применяют камеры с индивидуальной и групповой обработкой.

В первом случае партию пластин (25 шт.) помещают в камеру в кассете. Кассеты загружают вручную или автоматически через шлюз. Средняя производительность 250 пл/час при времени легирования 5-10 сек на одну пластину.

Перемещение пластин из шлюза осуществляется либо скольжением по направляющей наклонной плоскости, либо сбрасывание на резиновый бампер.

Применяют системы горизонтального перемещения пластин под действием вибрации.

В зависимости от конструкции приемной камеры применяют различные способы отвода теплоты от подложек (или его распределения). Размещение пластин на вращающемся барабане улучшает отвод теплоты от пластин.

В некоторых случаях держатели пластин охлаждают фреоном или деионизованной водой.

Вакуумная система

Вакуумные системы должны обеспечивать:

- рабочий вакуум в системе ионного транспорта и приемной камере не хуже $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па;
- максимальную скорость откачки высокоэффективных (желательно безмасляных) средств откачки;
- минимальное газовыделение конструкционных материалов.

Азотные ловушки на насосах, а также криогенные панели в объеме приемной камеры и внутри ионопровода повышают эффективность использования диффузионных откачных средств. Для быстрой смены подложек необходимы надежные вакуумные затворы и устройства для продувки сухим азотом ионопровода и приемной камеры в случае разгерметизации.

В промышленных установках применяют три базовые схемы систем вакуумной откачки.

1. Полностью диффузионная система, позволяющая получить относительно высокие скорости откачки. Она эффективна при откачке всех газов и обеспечивает относительно высокий вакуум ($1,5 \cdot 10^{-4}$ Па). В системе ионно-лучевой установки, как правило, применяют два-три диффузионных насоса. Недостатком этой схемы откачки является возможное попадание паров масла в ионно-транспортную систему и приемную камеру, что ухудшает качество технологического процесса.

2. Комбинированная система откачки имеет диффузионные и безмасляные насосы. Последние ставят для откачки приемной камеры. Как правило, при такой схеме используют две независимые вакуумные системы: диффузионный насос откачивает объем ионного источника, криогенный или турбомолекулярный насосы – приемную камеру и ионный тракт. Создают высокую степень разрежения ($\sim 1,5 \cdot 10^{-6}$ Па), экономичны и легко монтируются в вакуумной системе. Недостатком этих насосов является плохая работа при откачке водосодержащих газов.

3. Полностью безмасляная система откачки, в которой отсутствуют диффузионные насосы. В такой системе применяют турбомолекулярные и криогенные насосы или только криогенные.

Различают также три схемы построения вакуумных систем: с одной системой в середине вакуумной линии, обеспечивающей откачку всех объемов установки (в этом случае используют диффузионный насос большой мощности); с двумя независимыми системами, разделенными вакуумным затвором и откачивающими с одной стороны ионный источник, систему ионного транспорта, а с другой – приемную камеру; с тремя независимыми системами, откачивающими ионный источник, систему ионного транспорта и приемную камеру.

Системы контроля процесса должны обеспечить:

- однородность пучка
- настройку на центр пластины
- контроль амплитуды сканирования.

Промышленные установки ионного легирования

Автоматизированная промышленная установка ионной имплантации малых и средних доз «Везувий-7М» с индивидуальной обработкой пластин и безмасляной откачкой имеет неоднородность легирования 1% и

предназначена для производства полупроводниковых приборов с минимальными размерами элементов (менее 2 мкм). Диапазон доз, обеспечиваемый установкой, $10^{10} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$, максимальный ток пучка при энергии 100 кэВ для В+ -- 300 мкА, для Р+ -- 500 мкА, для As+ -- 300 мкА, энергия имплантации от 2220 до 100 кэВ, диаметр обрабатываемых пластин 76, 100, 125 мм, производительность для пластин 76 мм при дозе $6,25 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ – 40 шт/ч, потребляемая мощность 10кВА, габариты 1570x5000x1000, масса 3900 кг.

Установка сконструирована по схеме с послеускорением сепарированного на энергии экстракции пучка. В ней применены модифицированные ионные дуговые источники с прямоканальным катодом, встраиваемые в масс-сепаратор, что увеличивает время непрерывной работы установки без разгерметизации до 100 ч. В источнике используют газообразные (BF_3 , PF_5 , AsH_3) и твердые (красный фосфор, металлический мышьяк) рабочие вещества.

Масс-сепаратор, собранный на постоянных магнитах с напряженностью однородного магнитного поля $H=24 \cdot 10^4 \text{ А/м}$, имеет разные углы поворота для различных ионов (для В - 90° , для Р - 60°), малые габариты ионного источника позволяют быстро менять вещества. Хорошее выделение пучков В+ и Р+ обеспечивается установкой диафрагмы шириной 2 см на расстоянии 15 см от выхода магнита.

После диафрагмы с помощью одиночной (трехэлектродной) линзы пучок дополнительно фокусируют. Стандартная металлофарфоровая ускорительная трубка, на выходе которой установлен охлаждаемый регулируемый коллиматор, служит для ускорения пучка. Сканирование пучка - электростатическое двухкоординатное.

Дополнительное использование линз на входе и выходе отклоняющей системы снижает электронные нагрузки на высоковольтные блоки питания, уменьшает вторичную электронную эмиссию, повышает рентгенобезопасность установки и нейтрализует пространственный заряд пучка в области его отклонения и сканирования.

В приемной камере размещены четыре датчика в виде цилиндров Фарадея, которые позволяют осуществлять контроль однородности имплантации, настройку пучка на центр мишени и амплитуд сканирования. Дозы измеряют «глубоким» цилиндром Фарадея, дном которого служит подложкодержатель с пластиной.

В установке применена продольная приемная камера квазинепрерывной индивидуальной обработки с шлюзованием пластин. Основными ее достоинствами являются: короткий тракт перемещения пластин под углом 45° ; отсутствие дополнительного вибратора, малые габариты и масса. Благодаря продольной конструкции в чистой зоне камеры может находиться только приемная и передающая кассеты.

Вакуумная система состоит из двух унифицированных модулей, оснащенных турбомолекулярными насосами ТМН-1500, азотными криоловушками, стандартной запасной аппаратурой и измерительными

блокировочными вакуумметрами. Форвакуумную откачку осуществляют насосами НВР-16Д и 2НВР-5Д (каждый по два) для системы шлюзования приемной камеры.

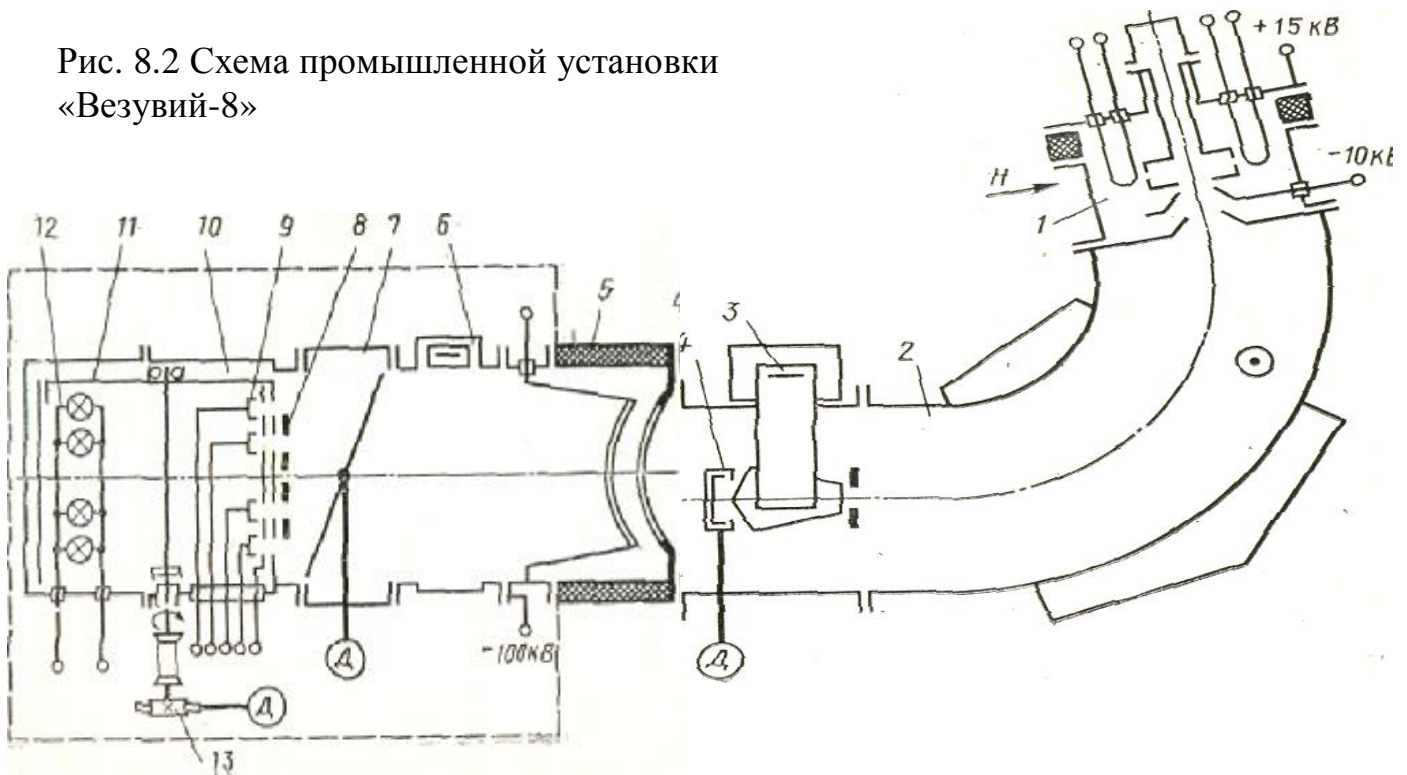
Сильноточная установка «Везувий-8»

Предназначена для имплантации больших доз ионов с массой до 200 а.е.м. и током 2—5 мА, при энергии до 100 кэВ в производстве интегральных схем на пластинах \varnothing 76, 100, 150 мм.

Установка создана по схеме с послеускорением и работает в двух режимах — полуавтоматическом — от оператора и автоматическом — от внешней управляющей ЭВМ. Диапазон энергии установки от 10 до 100 кэВ для легирующих ионов В⁺, Р⁺, Аз⁺, 2п⁺, Зь⁺, ток ионного пучка 2 мА для В⁺, 5 мА для Р⁺, 2 мА для Аз⁺, 2п⁺, Зь⁺, производительность при дозе $6,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ 100 шт/ч, неоднородность дозы имплантации менее 2%, режим обработки — групповой, сканирование по оси Х — механическое, по оси У — электромагнитное, температура подогрева легирующих пластин до 400 °С (встроенными нагревателями).

На установке применяют ионный дуговой источник с прямоканальным катодом. Для получения ионов В⁺ используют ВФз, напуск которого в источник осуществляют через игольчатый натекатель. Ионы Р⁺, Зп⁺, Ас⁺ и Сь⁺ получают из твердых веществ, испаряемых в тигле. Ионный пучок извлекают поперек магнитного поля, используя трехэлектронную щелевую оптику при напряжении вытягивания 15 кВ. На установке применяют электромагнитный масс-сепаратор с двойной фокусировкой пучка, который представляет собой секторный электромагнит с углом поворота пучка 110°. Для уменьшения абберации и оптимальной фокусировки в конструкции полюсных наконечников предусмотрена регулировка угла входа пучка в масс-сепаратор и выхода из него в пределах $\pm 150^\circ$.

Рис. 8.2 Схема промышленной установки «Везувий-8»



1- ионный источник, 2- масс-сепаратор, 3- система первичной фокусировки, 4 – экран, 5 – система ускорения, 6 – ионопровод, 7 – вакуумный затвор, 8 – диафрагма, 9 – датчики, 10 – вакуумная камера, 11 – приёмная камера, 12 – контрольно-измерительные приборы, 13 – механический привод барабана доступ к ионному источнику.

Для сканирования интенсивного ионного пучка в вертикальном направлении используют электромагнитное устройство, в магнитном поле которого ионный пучок отклоняется на определенный угол.

Система ускорения выполнена в виде однозачерного ускоряющего промежутка, образуемого двумя изолированными друг от друга щелевыми электродами специальной формы. Один электрод находится под потенциалом земли, на другой подается ускоряющее напряжение. Электрическую изоляцию осуществляют прямоугольным изолятором с развитой наружной поверхностью.

В установке применена приемная камера со сменными кассетами, позволяющими разместить на контейнерах 100 пластин 0 75 мм или 54 пластины 0 100 мм, или 24 пластины 0 150 мм. Во время имплантации контейнер непрерывно и равномерно вращается с частотой вращения 20 об/мин вокруг вертикальной оси, осуществляя механическое сканирование пластин в горизонтальном направлении.

Равномерность имплантации и измерение дозы производят универсальным дозиметром, датчики которого подключены к приборам контроля равномерности ионного тока на позиции имплантации; любой из датчиков можно подключить к блоку измерения дозы.

Установку откачивают паромасляным высоковакуум-ным агрегатом АВП-250/630; в зоне приемной камеры используют заливную криогенную ловушку. Вакуумной системой управляют в двух режимах: полуавтоматическом — по заданной программе, автоматическом — с подачей команд от внешней ЭВМ «Электроника-100И».

Оборудование для процессов литографии

Литография – процесс получения топологического рисунка на поверхности полупроводниковой пластины.

В зависимости от способа экспонирования пластины существуют следующие виды литографии:

- фотолитография ;
- электронография;
- ионная литография;
- рентгенография.

Таблица 9.1- Сравнительные технико-экономические характеристики различных методов литографии

Виды литографии	Методы литографии	Минимальная ширина линии, мкм	Точность совмещения, мкм	Плотность дефектов, см ²	Производительность, пл/ч
Фотолитография	Контактная фотолитография	1	±0,125	2,5	60
	Проекционная фотолитография 1:1	2,5-3	±1	1	60
	Проекционная фотолитография с уменьшением	1-1,5	±0,25	1	60
	Проекционная фотолитография с мультипликацией уменьшенного изображения	1-2	±0,25-0,5	1	10-60
Электронография	Сканирующая электронография	0,2-1	±0,05-0,1	0,5	От 1-2 до 22
	Проекционная электронография	1-2	0,2	0,5	60-120
Рентгеновский	Рентгенолитография	0,5-2	±0,1-0,25	1	10-60

9.1 Оборудование для фотолитографии

Фотолитография – процесс формирования рельефа в диэлектрических и металлических плёнках, нанесённых на поверхность полупроводниковой пластины. Её применяют для селективного удаления плёнки двуокиси кремния над теми участками пластин, где должны быть созданы диффузионные структуры.

Фотолитография включает следующие основные операции:

- подготовка поверхности полупроводниковой пластины;
- формирование слоя фоторезиста;
- формирование рельефа фоторезиста;
- формирование рельефа в окисле или металле;
- снятие слоя фоторезиста.

В соответствии с этапами технологического процесса фотолитографии оборудование классифицируется по назначению:

- для обработки поверхности пластины;
- для нанесения и термообработки фоторезиста;
- для совмещения и экспонирования, проявления и термообработки;
- для операций травления.

В последние годы в области полупроводникового машиностроения характеризуются переходом от установок, выполняющих отдельные технологические, к разработке автоматических линий и комплексов. Применительно к линиям фотолитографии наблюдается ещё одна важная тенденция: переход от групповой обработке пластин к индивидуальной обработке, что наилучшим образом обеспечивает главное требование технологического процесса – его воспроизводимость.

Наиболее полно поставленным задачам отвечают комплекты и автоматические линии фотолитографического оборудования, в основу работы которых положены следующие принципы:

- индивидуальная обработка пластин с использованием метода «кассета-кассета»;
- автоматическая подача пластины из кассеты на рабочую позицию и перегрузка её в приёмную кассету, что исключает загрязнение от рук и бой пластины;
- управление последовательностью и продолжительностью технологических операций с помощью блока управления или ЭВМ;
- работа по заданной программе, обеспечивающая абсолютную воспроизводимость технологических режимов, исключая влияние на техпроцесс субъективных факторов.

Таким образом, существуют две тенденции построения фотолитографических линий:

- стыковка модульных установок с индивидуальными постами загрузки-выгрузки пластин в кассеты, которые можно жестко стыковать попарно, конструктивно и энергетически (линии фирмы Ш и линия Class-1000 фирмы Macronetics (США), «Лада-электроника», «Лада-125» (СССР));

- жесткая линия, у которой посты загрузки-выгрузки пластин находятся в начале и в конце (линия Autofab-IV фирмы Cobilt).

Описанные линии отличаются системами транспортирования пластин, которые можно подразделить условно на три типа:

- транспортирование пластин на воздушной подушке;
- комбинированное транспортирование (на воздушной подушке и с помощью транспортной каретки);

- транспортирование пластин пассивах в строго горизонтальной плоскости с плавным изменением скорости в начале движения и при стыковке.

9.1.1 Подготовка поверхности подложек

Для обеспечения эффективности отмытки в качестве моющей среды используется жидкость высокой степени чистоты и деонизированная вода; отмытка производится непосредственно перед процессом, чувствительным к загрязнению; гидромеханическая отмытка должна следовать за химической (в случае совмещения двух видов отмытки), так как гидромеханическая отмытка позволяет удалить те загрязнения, для которых неэффективна химическая.

Качество отмытки и длительность технологического процесса определяются используемыми реактивами, материалом и конструкцией щёток. Материал щёток должен: не изменять своих исходных характеристик в воде, отмывать пластины согласно требованиям технологии, не вносить дополнительных загрязнений и дефектов, не допускать механических повреждений. .

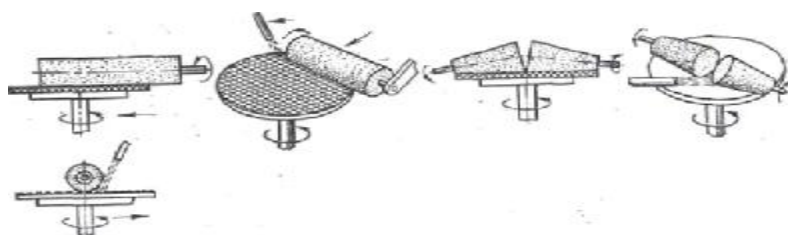


Рисунок 9.1 – Схемы отмытки пластин

В установках гидромеханической очистки пластин линий «Лада-электроника» и «Лада-125» применяется индивидуальная обработка пластины, находящейся на патроне центрифуги, вращающейся щёткой. В установках отмытки щетками фирмы Solitec используется смещенная по центру пластины щетка, вращающаяся против движения пластины. Наряду с очисткой пластин щеткой фирмами Macronetics, Cobilt, Kasper применяется

струйная очистка пластин. Этот метод особенно эффективен при удалении загрязнений из протравленных каналов, куда не достаёт щётка.

9.1.2 Формирование слоя фоторезиста

Формирование фотослоя – начальная операция собственно фотолитографического цикла, на которой закладывается качество фотолитографического процесса в целом. К ней предъявляются следующие основные требования: высокая адгезия фоторезиста к поверхности пластины, равномерность толщины плёнки фоторезиста по пластине и воспроизводимость толщины от пластины к пластине, минимальное количество проколов, отсутствие затеков фоторезиста на обратную сторону пластины.

Современное оборудование включает в себя модули *нанесения* и *сушки* (I термообработки) фотослоя. Способы *нанесения* фоторезиста: окунание, накатка, распыление, центрифугирование.

Распыление является наиболее универсальным способом формирования фотослоя и нанесения его на пластину в виде мелкодисперсного аэрозоля. Достоинствами метода являются возможность формирования покрытий в большом интервале толщин с достаточно высокой воспроизводимостью и небольшим разбросом по толщине, возможность нанесения фоторезиста на профилированные поверхности.

Требования к технологическому процессу:

- наличие сушки пластин перед нанесением фоторезиста;
- стабильность скорости центрифугирования в рабочем интервале 500-600 об/мин (допустимая нестабильность $\pm 5\%$);
- минимальное и фиксированное время разгона центрифуги (0,1 – 0,15 с);
- постоянство дозы фоторезиста;
- стабильность времени центрифугирования.

Установки нанесения фоторезиста Macronetics, III, In-Line Technology, «Лада-электроника», «Лада-125» выполняют цикл обработки по одному принципу:

- автоматическая выдача пластин из кассеты;
- автоматическое транспортирование пластины на позицию обработки (столлик центрифуги);
- обдув платины азотом;
- дозированная подача фоторезиста на пластину;
- центрифугирование пластины с заданной скоростью;
- автоматическое транспортирование на следующую технологическую операцию.

Автомат нанесения фоторезиста, входящий в состав линии «Лада-125», предназначен для обработки пластин диаметром 75, 100, 125 мм. Все агрегаты автоматов линий выполнены из унифицированных блоков и отличаются только применением того или иного узла, определяющего их технологическую принадлежность.

Операция *термообработки*, завершающая процесс формирования фотослоя, имеет целью удаление из пленки летучих компонентов. Термообработка в современных линиях фотолитографии производится ИК нагревом. В качестве нагревателя применяются ИК лампы и темные ИК излучатели. В установках термообработки, входящие в линии «Лада-электроника» и «Лада-125», снабжены «темными» источниками ИК излучения в виде тонкой токопроводящей пленки, нанесенной на лист кварцевого стекла. Термообработка производится за относительно короткое время 2,5-5 мин при непрерывной продувке азотом

9.1.3 Экспонирование

Практическое применение в производстве нашли *контактное* и *проекционное* экспонирование.

Ввиду высоких требований к точности совмещения (не более долей микрона) *контактное* проецирование выполняется на специальном прецизионном оборудовании - установках совмещения и экспонирования, представляющих собой сложные оптико-механические комплексы. Установки характеризуются методом и точностью совмещения, разрешающей способностью, качеством контакта, производительностью, сроком службы фотошаблонов (интенсивность износа), допускаемыми размерами пластины.

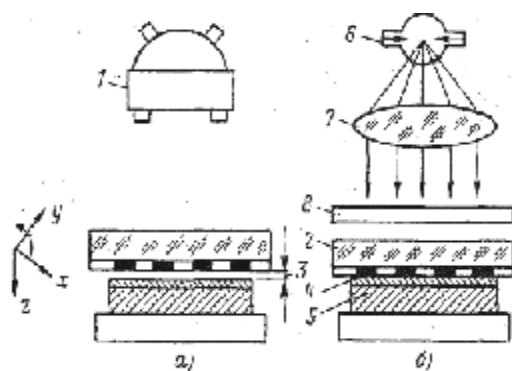


Рисунок 9.2 – Принципиальная схема контактной установки

На рис. 9.2 представлена принципиальная схема контактной установки совмещения и экспонирования. Основными элементами установки являются микроскоп 1 для визуального контроля процесса совмещения, фотошаблон 2, на определённом расстоянии 3 от которого (расстояние меньше глубины резкости микроскопа) расположена пластина 4. в процессе совмещения пластина перемещается по координатам X,Y и по углу φ на координатном

столе 5. после того, как достигнуто с требуемой точностью совмещение, пластина плотно контактирует с фотошаблоном и производится ее экспонирование ртутной лампой сверхвысокого давления 6 через конденсатор 7, обеспечивающий необходимую равномерность освещенности по всей поверхности подложки, и затвор 8.

Основными механизмами установок контактного совмещения и экспонирования являются:

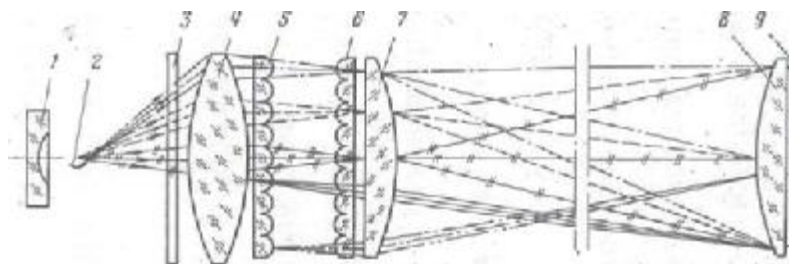
- микроманипулятор совмещения;
- механизм ориентации плоскости подложки;
- шаблондержатель;
- загрузочное устройство;
- узел контактного экспонирования;
- микроскопы для визуального контроля.

Манипулятор должен обеспечивать независимость координатных перемещений, достаточные размеры полей, высокую чувствительность, определенный алгоритм перемещений, перемещения в плоскости, параллельной плоскости фотошаблона. Существуют следующие конструкции микроманипуляторов совмещения: координатно-поворотный стол с направляющими качения и винтовым приводом; плоский стол с пантографным приводом; манипуляторы с магнитострикционным приводом.

Механизмы ориентации плоскости подложки обеспечивают расположение подложки строго параллельно рабочей плоскости фотошаблона и перемещают подложку с высокой точностью при контактировании с фотошаблоном.

Крепление фотошаблона к *шаблондержателю* может осуществляться при помощи вакуума (эмульсионные фотошаблоны) или механическое крепление, к примеру, с помощью байонетного замка (с толщиной фотошаблона в несколько миллиметров).

Узел контактного экспонирования включает в себя источник света, оптическое устройство для создания светового потока, механизм управления передачей светового потока и кожух для размещения источника света. Оптическое устройство предназначено для создания равномерного светового потока с параллельным пучком лучей в определенном диапазоне длин волн на всем поле экспонирования. Примером может служить растровый осветитель, приведенный на рис. 9.3.



9.3 - Оптическая схема растровой осветительной системы

Механизм управления передачей светового потока – затвор необходим для того чтобы задавать нужное время экспонирования, которое зависит от чувствительности фоторезиста.

Точное взаимное расположение совмещенных структур определяется с помощью *микроскопа* для визуального наблюдения и контроля качества совмещения.

Установки *проекционного совмещения* и экспонирования позволяют избежать контактирования подложки и фотошаблона, что повышает стойкость фотошаблона и способствует повышению разрешения изображения.

По способу формирования изображения на подложке системы проекционной фотолитографии подразделяются на системы: с одновременным переносом изображения на поле пластины, с последовательным мультиплицированным переносом изображения, с последовательным сканирующим переносом изображения. Эти системы содержат осветитель 1, устройства совмещения и фокусировки (ручной или автоматической) 2, контроля совмещения 3, манипуляторы совмещения 4, на которых размещаются фотошаблон 5, проектируемый через объектив 6 на пластину 7, размещенную на манипуляторе (координатном столе) 8. Рабочее поле проекционного объектива 50-80 мм.

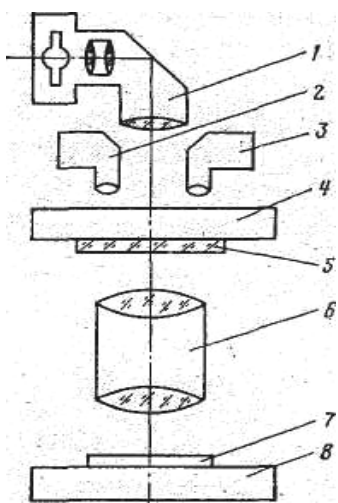


Рисунок 9. 4 - Проекционное совмещение

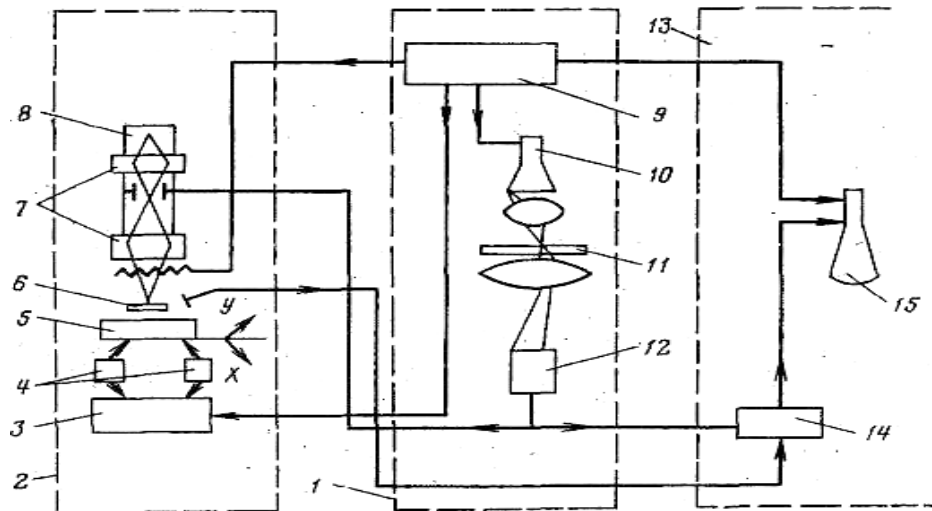
Способы совмещения фотошаблона и подложки: с визуально контролируемым положением их относительно друг друга с помощью базовых меток (знаков совмещения),

Процесс совмещения может быть выполнен оператором, который визуальнo контролирует взаимное расположение фотошаблона и подложки. Перемещает их при помощи микроманипулятора до совмещения. При автоматическом совмещении фотоэлектрическое устройство анализирует положение знаков совмещения на подложке и фотошаблоне, вырабатывает сигнал рассогласования, который поступает в привод микроманипулятора и вызывает перемещение подложки. При полном совмещении сигнал рассогласования исчезает и привод выключается.

9.2 Оборудование для электронной литографии

Электронолитография предназначена для формирования топологических рисунков в чувствительных к электронам резистах. *Электронно-лучевые установки* (ЭЛУ) могут проводить экспонирование электронорезиста тонко сфокусированным пучком электронов, отклоняемым

электрическими и магнитными полями по программе от ЭВМ. ЭЛУ состоит из большого количества сложных устройств. На рис. 9.5 приведена типовая схема ЭЛУ, которая состоит из трех основных блоков: фотокопировального устройства или телекопира 1, электронно-оптической системы (ЭОС), которые позволяют проводить одновременный перенос изображения шаблона или маски на участок электронорезиста, с камерой экспонирования 2 и видеоконтрольного устройства 13. Электронный пучок от кинескопа 10, пройдя через фокусирующее устройство, считывает рисунок топологии на фотошаблоне 11 и передает информацию на фотоумножитель 12. Информация от фотоумножителя поступает в блок управления 14 видеоконтрольного устройства с кинескопом 15 и управляет электронным лучом, который формируется электронной пушкой 8

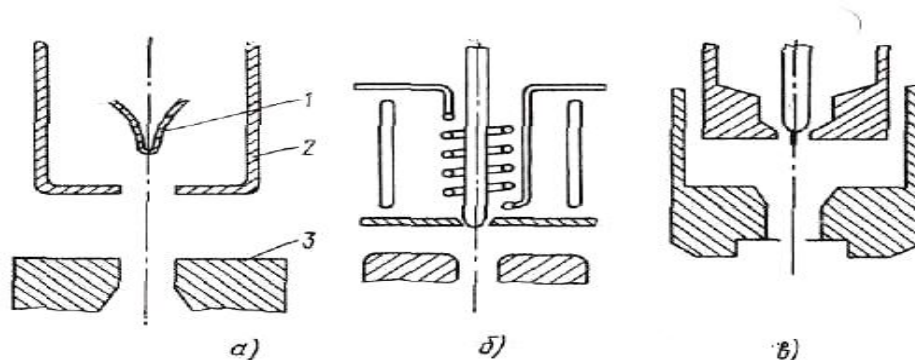


пройдя через фокусирующее устройство, считывает рисунок топологии на фотошаблоне 11 и передает информацию на фотоумножитель 12. Информация от фотоумножителя поступает в блок управления 14 видеоконтрольного устройства с кинескопом 15 и управляет электронным лучом, который формируется электронной пушкой 8

Рисунок 9.5 – Принципиальная схема установки электронно-лучевого экспонирования

и электронными линзами 7. электронный пучок воздействует на фоторезистивный слой на поверхности подложки 6. Блок 9 служит для управления системой отклонения луча и приводами 3 и 4 перемещения координатного стола 5.

В электронной литографии используются электронные пушки мощностью до 1 кВт, которые должны обладать высокой яркостью, максимальной плотностью тока и минимальными (до нанометров) размерами поперечных сечений пучка. Конструкции электронных пушек приведены на рис.9.6. Источники электронов выполняются в виде катодов трех типов: прямоканальный V-образный вольфрамовый термоэмиссионный катод (а); эмиттеры с повышенной яркостью выполняются в виде стержня



изгексаборида лантана (б);

Рисунок 9.6 – Конструкции электронных пушек

автоэмиссионный источник электронов (в). На рис. 9.7 приведены основные ЭОС, применяемые в электронолитографии.

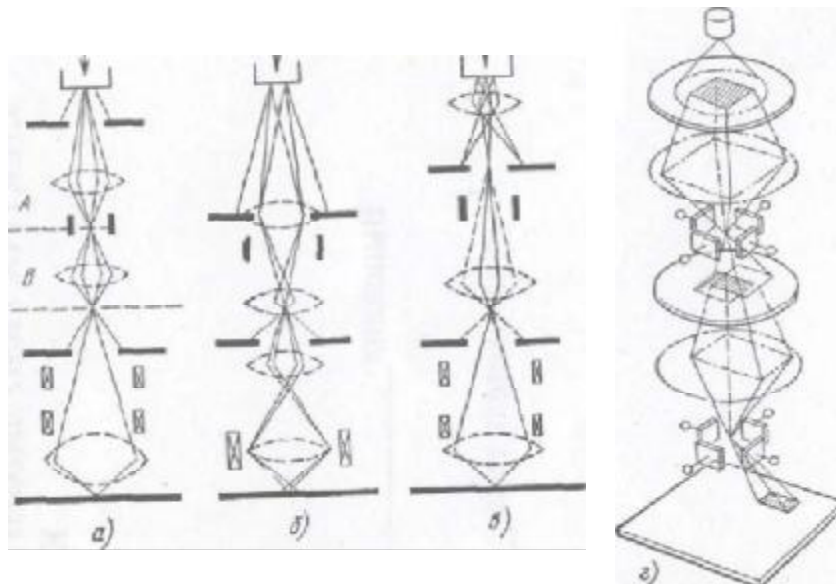


Рисунок 9.7 – Электронно-оптические системы

9.4 Оборудование для ионно-лучевой литографии

Применение в микролитографии *ионных* пучков вместо электронных позволяет повысить разрешающую способность процесса и уменьшить время экспонирования. Это достигается тем, что в отличие от электронолитографии, образование обратно рассеянных ионов незначительно. Вторичные электроны имеют низкую энергию, длина пробега не превышает 0,01 мкм. Кроме того, энергия ионов сильнее поглощается в слое резиста, чем энергия электронов.

В ионной литографии формирование топологического рисунка может вестись двумя способами: остро сфокусированным ионным зондом и переносом с помощью ионных пучков изображения маски-шаблона.

Основные узлы установок ионной литографии:

- источники ионов;
- электростатические линзовые системы для фокусировки пучка и построения изображения маски-шаблона;
- отклоняющие системы;
- прецизионный координатный стол;
- системы питания и управления.

Ионные источники должны обеспечивать максимальную яркость, однородность состава пучка по массе и заряду ионов и стабильность пучка, минимальные разброс ионов по энергиям относительно среднего значения и

расходимость пучка. В ионной литографии преимущественно применяются три типа ионных источников: дуоплазмотронный, жидкометаллический и газофазный с полевой ионизацией.

9.5 Оборудование для рентгеновской литографии

Рентгенография – процесс экспонирования фоторезиста мягкими

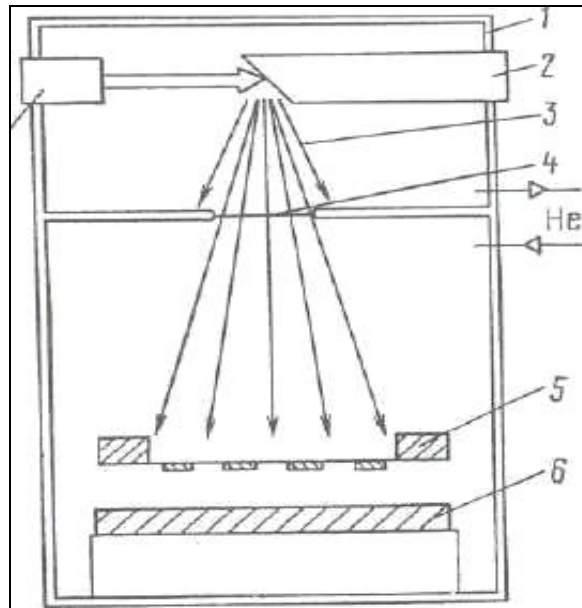


Рисунок 9.8 — Принципиальная схема рентгенолитографии

рентгеновским лучами с длиной волны в диапазоне 5-50 Å. Ввиду отсутствия линз для фокусировки излучения со столь малой длиной волны экспонирование ведется расходящимся пучком от точечного источника. Система для рентгенографии напоминает обычную фотолитографическую систему. Она имеет источник излучения, шаблонов и пластину, покрытую фоторезистом (рис.9.8). Источник излучения смонтирован в вакуумной камере 1. Испускаемые им рентгеновские лучи проходят вначале тонкое окно 4 (бериллиевая пластина), а затем через атмосферу гелия и, наконец, через шаблон, экспонируя резист на пластине 6.

9.6 Оборудование для проявления, термообработки, травления слоя и удаления маски

Проявление фотослоя является процессом, от которого зависит точность воспроизведения геометрических размеров элементов топологии. От выбора способа нанесения проявителя на фотослой определяет степень интенсификации процесса проявления, т.е. повышение коэффициента

массопередачи. Существуют иммерсионный (погружение с перемешиванием раствора) способ и метод распыления (пульверизации) проявляющего раствора. Последний является основным, так как преобладает преимуществом в отношении интенсификации и автоматизации процесса, а так же экономии реагентов. Цикл проявления заключается в последовательном выполнении операций: проявления, промывки первой, промывки второй, сушки. Работа автоматов предусматривается в трех режимах: автоматическом, полуавтоматическом и ручном.

Операции травления осуществляются на основе использования *химического* или *плазмохимического* методов.

Химический метод обработки пластин характеризуется:

- агрессивностью реагентов и отсюда необходимостью применения замкнутых рабочих объемов, коррозионно-стойких конструктивных материалов для функциональных рабочих блоков;
- термостатированием рабочих объемов и отсюда необходимостью применения блоков стабилизации и управления техпроцессов;
- необходимостью нейтрализации химических реагентов.

Для реализаций операций формирования топологии химическим методом используются универсальные установки, входящие в комплекс универсального оборудования для химической обработки пластин.

Назначение комплекса:

- очистка пластин перед первым окислением;
- травление окисных слоев, боросиликатных и фосфоросиликатных стекол;
- удаление фоторезиста с окисных слоев и металлических поверхностей;
- очистка окисных слоев и металлических поверхностей после удаления фоторезиста;
- травление металла и кремния.

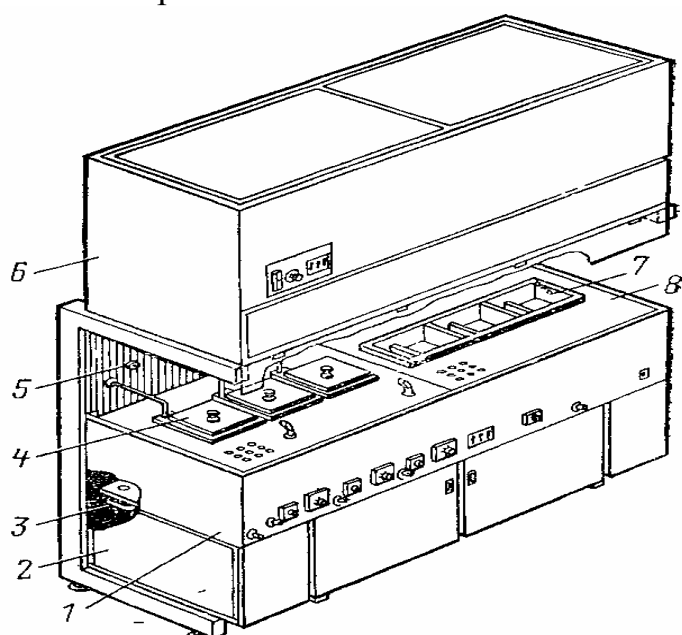


Рисунок 9.9 –Установка химической обработки пластин

Комплекс состоит из семи самостоятельных линий, комплектуемых в зависимости от технического назначения установками химической обработки, отмывки и сушки, обработки в органических растворителях, ультразвуковой и гидромеханической отмывки и установками контроля.

Типичным является конструктивное исполнение установки химической обработки пластин 084ХП-100-004 (рисунок 9). Установка состоит из блоков технологического и обеспылевания.

Метод обработки пластин групповой, кассетный, имеется два типоразмера кассет для изделий с диаметром 65 и 75 мм. Технологический блок 1 на основании 2 ставится на стойки установки обеспыливания 6. технологический блок выполнен в виде ванны из древесно-стружечной плиты, облицованной полипропиленом. На отбортовку ванны ставится перфорированная решетка 8 с отверстием для размещения технологических ванн. Во фторопластовой ванне 4, имеющей погружной нагреватель, производится химическая обработка пластин в объеме различных реагентов. Фторопластовые ванны 4 снабжаются эжекторами для откачки кислоты после окончания технологического процесса. Разбавленная водопроводной водой кислота сливается на дно технологического блока 1 и затем через сливной трубопровод 3 на станцию очистки промышленных стоков. Следующий этап – отмывка пластин деонизированной водой – осуществляется в каскадной ванне промывки 7. перемещение кассет с пластинами – ручное. С целью исключения попадания на обрабатываемые пластины пыли из производственного помещения технологические блоки размещаются в установках обеспылевания 6, создающих ламинарный поток обеспыленного воздуха. Поддержание необходимых температурных режимов – автоматическое, об окончании технологических операций сигнализирует лампа сигнальная 5.

Плазмохимический метод позволяет выполнять некоторые, а в перспективе все перечисленные выше операции без использования жидких реагентов. Обработка пластин осуществляется в низкотемпературной кислородной или галогеноуглеродной газовой плазме, возбужденной в рабочем объеме камеры посредством ВЧ или СВЧ разряда.

Плазмохимическое травление обеспечивает более высокую разрешающую способность, управление профилем травления, снижает боковое подтравливание по сравнению с химическим жидкостным травлением, что приводит к повышению точности геометрических размеров топологии. Технологические процессы обработки поверхности пластин полностью автоматизированы.

Основными требованиями, предъявляемыми к установкам для плазмохимической обработки, являются:

- высокая однородность распределения электрически нейтральных радикалов, атомов и разряженных частиц по всему объему реакционного пространства;

- воспроизводимость энергетического состояния плазмы во время и от процесса к процессу;
- высокая стабильность тепло- и массообмена в реакционном пространстве;
- контроль момента окончания процесса травления одного материала.

Для повышения указанных требований оборудование для плазмохимической обработки должно быть управляемым по многим параметрам: давлению, скорости потока газа, мощности в разряде, частоте ВЧ колебаний электрического поля, температуре пластин.

Для получения низкотемпературной газовой плазмы в установках плазмохимической обработки используется ВЧ электрический разряд в газе низкого давления.

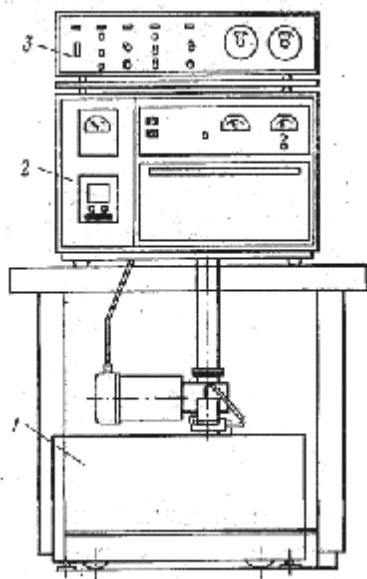


Рисунок 9. 10 – Установка плазмохимического удаления фоторезиста «Плазма-600»

Отечественная установка «Плазма-600» предназначена для плазмохимического удаления фоторезиста и преддифузионной очистки поверхности полупроводниковых пластин с безэлектродным возбуждением разряда посредством индуктивной связи (рисунок 10). Основными узлами установки являются блок вакуумной откачки 1, блок реакционно-разрядных камер и ВЧ генератора 2 и блок управления 3. низкотемпературная плазма образуется в камере при разряжении порядка 60-133 Па, когда к индикатору, расположенному вокруг камеры, подается ВЧ напряжение. В установке может осуществляться последовательная обработка пластин в двух газоплазменных средах. При напуске в камеру кислорода до давления 133 Па под действием разряда образуются атомарный кислород и ионы кислорода, обладающие высокой химической активностью. Они окисляют фоторезист, образуя в результате химических реакций летучие соединения. Конечными продуктами реакции разложения фоторезиста являются CO, CN, CO₂, H₂O, откачиваемые из камер вакуумным насосом. При напуске в камеру фреона-14 до давления от 40 до 70 Па под действием разряда образуется атомарный фтор, который в результате химической реакции очищает поверхность

пластин от окислов и загрязнений. Блок камер и генератора включает в себя реакционно-разрядные камеры, ВЧ генератор, вакуумметр и систему вентиляции для охлаждения камер и приборов генератора. Камера представляет собой кварцевую трубу, спереди герметично уплотняемую дверцей, а сзади присоединенную к вакуумной системе. Трубу опоясывают витки индуктора ВЧ. Управление процессом осуществляется автоматически, но предусмотрен и ручной режим.

Кроме плазмохимического метода обработки поверхности полупроводниковых пластин, в настоящее время развивается и другой метод прецизионной обработки – *ионно-химический*. Он отличается от плазмохимического более высокой энергией плазменного пучка ионов и радикалов фтор- и хлорсодержащих газов, направленного на обрабатываемую пластину при давлении $(1-5) \cdot 10^{-2}$ Па.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ

Успешное развитие ряда направлений науки и техники в значительной степени определяется прогрессом в области тонкопленочных покрытий которые позволяют целенаправленно изменять оптические, механические, химические, электрофизические, магнитные и другие свойства поверхности материалов. Наиболее широко распространенной промышленной технологией для получения тонких пленок является их нанесение в вакууме. В настоящее время наиболее распространенным типом вакуумного оборудования являются универсальные установки, базовую часть которых можно использовать как в электронике так и в оптике и которые оснащаются набором технологической оснастки по заказу потребителя. Разнообразие процессов и материалов, используемых для получения покрытий, а также возрастающие требования к точности, воспроизводимости, надежности и производительности напылительных установок требует их непрерывного совершенствования, создание многочисленных видов дополнительной оснастки и перехода к автоматизации технологических процессов.

1.1 Состав оборудования для нанесения покрытий в вакууме

К вакуумному оборудованию предъявляются следующие требования:

- высокая скорость откачки газов из рабочей камеры;
- минимальный обратный поток паров из вакуумных насосов в камеру;
- разборность установки для удобства эксплуатации;
- высокая производительность при групповой обработке подложек.

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

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

$$Q = \frac{1}{(t_p + t_x)}, \quad (10.1)$$

где t_p - время технологического воздействия на подложку (рабочее); t_x - вспомогательное (холостое) время.

Рабочее время t_p складывается из времени предварительного нагрева

подложки t_H , времени нанесения пленки t_{II} и времени охлаждения t_O подложки перед разгерметизацией камеры:

$$t_P = t_H + t_{II} + t_O. \quad (10.2)$$

Холостое время t_X складывается из времени напуска воздуха в рабочую камеру и ее открытия t_K , времени загрузки подложек t_3 и времени откачки рабочей камеры t_B :

$$t_X = t_K + t_3 + t_B. \quad (10.3)$$

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

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

- периодического действия, используемые в мелкосерийном производстве и для отработки технологических процессов;
- полунепрерывного действия, используемые в серийном производстве с относительно частой сменой технологического процесса;
- непрерывного действия, используемые в крупносерийном и массовом производстве.

Основными системами и устройствами вакуумного оборудования являются:

- вакуумная система (камера, насосы, фланцы, трубопроводы, уплотняющие элементы, затворы, клапаны, вентили, вакуумные реле, натекатели, ловушки, азотные питатели);
- устройства для генерации потоков наносимого вещества;
- устройства для ионной очистки;
- система контроля параметров техпроцесса и управления режимами работы установки (приборы для измерения вакуума, скорости осаждения, толщины пленок, температуры испарителей и подложек, аппаратура для автоматического управления процессом откачки);
- транспортирующие устройства (арматура для вращения подложек, перемещения испарителей и распылителей, шлюзовые устройства);
- системы электропитания, гидро - и пневмосистемы;
- газовая система (клапаны, натекатели, расходомеры, смесители, редукторы);
- вспомогательные устройства (нагреватели, охладители, экраны, заслонки, дозаторы и т.п.);
- микроконтроллеры, микро-ЭВМ.

На рис.10.1 приведена структурная схема установки вакуумного напыления.

Основным элементом установки вакуумного напыления (УВН) является

вакуумная камера. В течение многих лет в качестве стандартной камеры использовался цилиндрический стеклянный или стальной колпак. Таким колпаком до настоящего времени снабжаются несложные и недорогие установки, предназначенные для простейших видов покрытий. Разновидностью подъемного колпака является откидной колпак уменьшенной высоты, используемый обычно в установках катодного и магнетронного распыления, где расстояние источник-подложка выбирается минимальным. Современный подход к построению УВН определяется необходимостью жесткого технологического контроля хода процессов, высокой производительностью и удобством обслуживания. Универсальные УВН последних лет выпуска имеют просторную камеру кубической или полуцилиндрической формы с определяющим размером (диаметром или высотой) от 0,5 до 1,5 м. Размеры двери камеры, равные по площади ее максимальному сечению, позволяют без препятствий загружать в установку различные изделия. "Шкафной" тип конструкции камеры позволяет, во-первых, перенести откачной патрубок на боковую стенку и увеличить его диаметр, что повышает скорость откачки; вынос откачного агрегата из-под станины камеры устраняет ограничение на его размеры и тип. Во-вторых, появляется возможность использовать дефицитную площадь под днищем камеры для размещения дополнительных испарителей, тоководов и вводов вращения, окон фотометрического контроля, ИК-излучателей и т.п. В боковых стенках помимо фланца откачки размещают и подачу технологических газов, датчиков. В двери устанавливают одно или несколько смотровых окон с устройствами, уменьшающими степень их запыления. В верхней части камеры обычно располагается ввод вращения подложкодержателей, манометрические вводы, вводы нагрева и охлаждения.

Для нанесения покрытий на широкоформатные подложки, например на оконные стёкла, лавсановую ленту и т.п., используются прямоугольные камеры «in line» с вертикальным или горизонтальным расположением, имеющие большие длину и ширину (до 10-15 м) и небольшую высоту (около 0,1 м). Они, как правило, снабжены шлюзовыми устройствами и устройствами перемещения подложек конвейерного типа.

Большинство процессов нанесения покрытий требует создания в технологическом объеме камеры вакуума порядка 10^{-4} - 10^{-5} Па. С учетом значительных объемов камер (200-1000 л и более) для его получения и поддержания в условиях больших потоков десорбции и напускаемых технологических газов необходима достаточно мощная система вакуумной откачки. Условия вакуумной гигиены в рабочей зоне УВН, необходимость максимально чистого вакуума в камере, минимума шума и вибраций обуславливают жесткие требования к конструкции и параметрам системы вакуумной откачки.

Основным средством получения вакуума остается агрегат на основе механического вращательного насоса (или комбинации вращательных насосов), па-

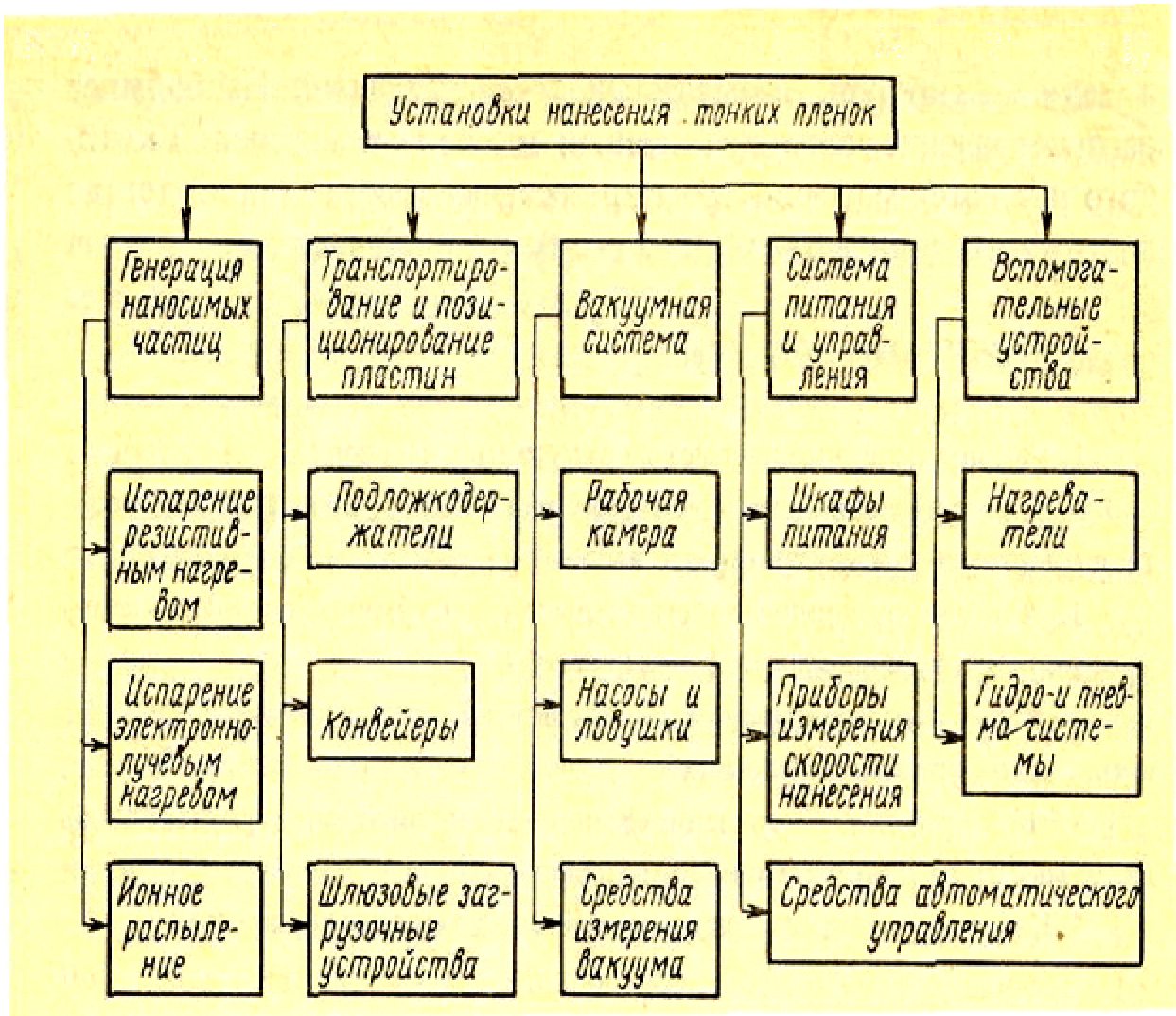


Рисунок 10.1 - Структурная схема установки вакуумного напыления

ромазляного диффузионного насоса и шевронной ловушки, охлаждаемой проточной водой, холодильным реагентом или жидким азотом. Подобными системами оснащаются до 90% моделей выпускаемых установок. В них используются паромасляные насосы с быстротой откачки от 250 до 15000 л/с при диаметре откачного патрубка вакуумной камеры от 300 до 800 мм. Приблизительно в одной трети УВН предусмотрена возможность комплектации установки по заказу потребителя турбомолекулярным, криогенным или ионно-сорбционным насосами.

Стыковка вакуумных элементов системы с камерой и между собой в современных установках осуществляется, как правило, малогабаритными фланцами по стандартам ИСО, которые просты в изготовлении и имеют уменьшенный наружный диаметр, что может оказаться очень важным в условиях недостатка пространства. Для крепления таких фланцев используются быстроразъемные соединения с накидным хомутом или с зажимными скобами.

1.2 Характеристики и конструктивные особенности устройств для генерации потоков наносимого вещества

По способам создания потоков наносимого вещества методы вакуумного осаждения можно разделить на три группы: термическое испарение, ионное распыление, термоионное осаждение. Каждый из этих способов имеет свое специфическое конструктивное оформление.

Рассмотрим подробнее наиболее перспективные способы вакуумного осаждения, получившие наибольшее распространение.

Резистивное испарение – наиболее простой способ. Конструктивно он включает в себя собственно испаритель (проволочный, ленточный или тигельный), медные водоохлаждаемые тоководы и блок питания, позволяющий пропускать ток через испаритель до 500 А. Основные недостатки этого способа: низкая контролируемость процесса, невозможность испарять тугоплавкие материалы, загрязнение пленки материалом испарителя, нарушение стехиометрии пленок при испарении сплавов, химических соединений. Последний недостаток частично устраняется при использовании метода "взрывного испарения". В этом случае материал сложного состава в виде мелких гранул или порошка с помощью вибробункера подается на раскаленную ленту из углеграфитовой ткани или вольфрама. Этим достигается одновременное испарение компонентов сложного вещества.

Среди термических способов, электроннолучевой нагрев получил наибольшее применение в промышленных установках.

Для электроннолучевого нагрева в промышленности используется электроннолучевые испарители (ЭЛИ) с пушкой Пирса и ЭЛИ с криволинейным лучом (или с поворотом луча).

При осаждении тонких пленок в установках средней и высокой производительности экономически более выгодно использовать малогабаритные ЭЛИ с криволинейным лучом (рис.10.2), которые особенно удобны для монтажа в установках с вертикальным подъемом колпака или в камерах с открывающейся дверью. Эти ЭЛИ отличаются малыми габаритами, широким диапазоном мощности пучка.

Работа ЭЛИ с криволинейным пучком осуществляется следующим образом. Электронный луч формируется в электронной пушке, состоящей из вольфрамового катода 3, заземленного анода 2 и отражателя 4, находящегося под небольшим отрицательным потенциалом относительно катода. Получив ускорение в электрическом поле, образованном между катодом и анодом, приложенным к катоду ускоряющим напряжением (5-20кВ), пучок электронов 5 движется далее в магнитном поле, создаваемом полюсными наконечниками 8. Величина магнитного поля может регулироваться изменением тока катушки 1. Под действием магнитного поля H происходит искривление траектории электронного луча.

Магнетронное распыление – это высокопроизводительный процесс нанесения тонких пленок металлов, полупроводников и диэлектриков со

скоростями осаждения в диапазоне единиц мкм/мин и относительно низкой температурой поверхности осаждаемых пленок. По существу магнетронная система распыления (МСР) представляет собой обычную диодную систему распыления, в область разряда которой введено постоянное магнитное поле.

МСР работает следующим образом. В зоне над поверхностью мишени из распыляемого материала, где электрическое E и магнитное H взаимно перпендикулярны, образуется область локализации плазмы, имеющего форму замкнутого кольца, в котором электроны двигаются по непрерывным траекториям, совершая так называемый дрейф Холла. С помощью электрического поля, создаваемого отрицательным потенциалом мишени-катода, ускоренные ионы, вытягиваемые из плазменного кольца, бомбардируют мишень, выбивая атомы распыляемого материала. Зона распыления представляет собой кольцеобразную выемку на поверхности мишени. Можно изготовить магнетроны с различными формами мишени и любых размеров.

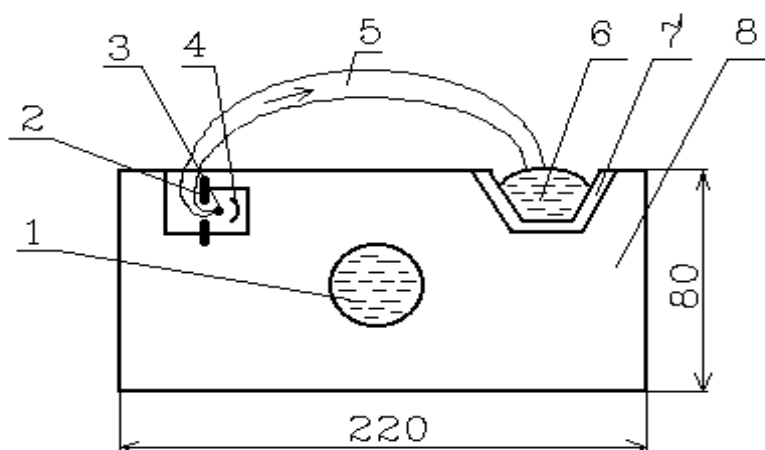


Рисунок 10.2 - Схема ЭЛИ с поворотом луча

Ионно-лучевые распылительные системы (ИЛРС) создаются в основном на базе ионных источников Кауфмана и холловских ускорителей с анодным слоем. Ионный источник Кауфмана осуществляет ускорение ионов путём подачи напряжения на специальную сетку-электрод, при этом ионы проходят через ячейки сетки. Однако в этом случае происходит распыление сетки ионами, и материал сетки попадает в мишень, что вызывает загрязнение последней.

Преимуществом ионных источников на основе плазменных ускорителей является отсутствие ионно-оптической системы, что существенно упрощает их конструкцию и увеличивает ресурс работы. Ионные источники на базе ускорителей с анодным слоем содержат кольцевой анод 1 и электромагнитную систему, состоящую из катушки соленоида 4, катодов 2 и магнитопровода 3 (рис.10.3).

С помощью катушки соленоида создается радиальное магнитное поле в ускоряющей промежуточной-зазоре между катодом и анодом, а между анодом

катодом, который обычно находится под земным потенциалом – электрическое поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям магнитного поля. Электроны (в любом газе всегда имеется некоторое количество свободных электронов из-за воздействия различных ионизирующих излучений, например, космическая радиация, естественный радиоактивный фон и т.д.), совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных E H -полях, ионизируют атомы рабочего газа и в прианодном слое возникает плазменный разряд. Т.к. анод находится под большим положительным потенциалом $0,5-5\text{кВ}$, то ионы будут отталкиваться от него, приобретать энергию, равную $E=(0,5-0,7)U_A$, и будет формироваться пучок ускоренных ионов, который будет иметь трубчатую (О - образную) форму. Данный пучок можно направить на мишень из распыляемого материала, или на подложку с целью очистки и травления последней.

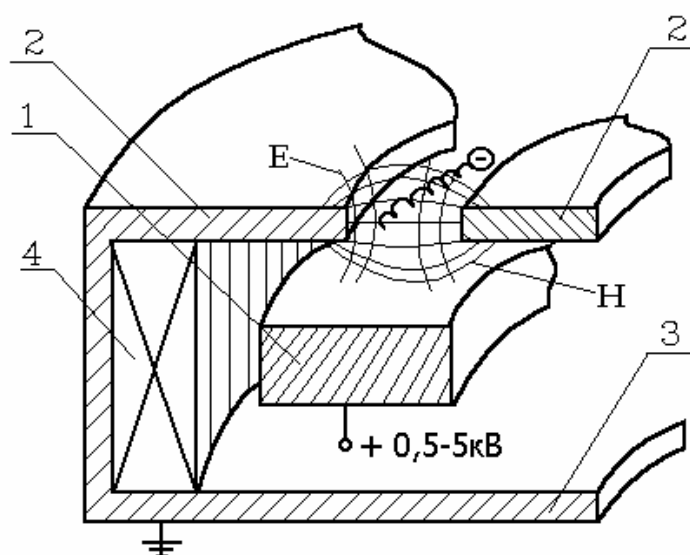


Рисунок 10.4 - Схема холловского ускорителя с анодным слоем

Производительность установок и качество получаемых покрытий в значительной степени определяются конструкцией и разнообразием выбора подколпачной арматуры, которая должна обеспечивать максимальную загрузку и минимальную неоднородность по толщине (1-5%). Для достижения высокой равномерности толщины пленок используются в основном приемные поверхности следующих типов:

- а) сферический приемный свод с вращением вокруг своей оси, совпадающей с осью камеры или смещенной относительно нее (рис. 10.5, а);
- б) тороидально-сферический свод с планетарным вращением (рис. 10.5,б);
- в) наклонный плоский приемный свод с плоскими наклонными планетами (рис. 19.5, в).

Как правило, источник испарения смещён относительно оси вращения приёмной поверхности.

В устройствах для нагрева и поддержания температуры подложек в

качестве нагревателей обычно используются ТЭНы, кварцевые галогенные лампы, или специальные ИК-излучатели. Следует отметить, что указанные способы нагрева затрудняют точный контроль, температуры самих подложек в процессе их вращения, и эта температура принимается равной температуре окружающей арматуры, что вносит определённую погрешность. Другой серьёзной проблемой является обеспечение беспрепятственного вращения карусели подложек в опорах при температурах до 400°C в условиях вакуума и при отсутствии консистентных смазок.

Необходимыми узлами современных УВН являются приборы контроля свойств наносимых пленок и контроля основных параметров технологического процесса, которые необходимы для воспроизводимости процессов напыления и их автоматизации.

В настоящее время наибольшее распространение получили следующие методы измерения толщины и скорости осаждения пленок: метод кварцевого генератора, метод измерения удельного сопротивления "свидетеля", оптические методы. В современных установках наиболее широко используются кварцевые датчики и оптические (фотометрические) системы измерения.

Принцип действия кварцевого измерителя толщины основан на регистрации изменения частоты колебаний кристалла кварца при конденсации на нем пленки напыляемого вещества. Для стабильной работы прибора необходимо обеспечить тепловую экранировку кристалла, стабилизировать уровень возбуждения кристалла и напряжений питания генератора.

Типичная конструкция измерительной головки прибора показана на рис.10.6. Она состоит из водоохлаждаемого медного корпуса 1 с каналом для воды 4. Поток пара вещества 5 падает вертикально на поверхность кристалла кварца 6, укрепленного с помощью пружинных зажимов на съемном держателе 2, установленном на прокладке 3. Пружинные зажимы позволяют легко снимать кристалл для очистки и повторного использования.

В последнее время в приборах обычно используется цифровая система контроля скорости осаждения толщины пленок, а также устройство автоматической остановки процесса при достижении заданной толщины.

С помощью фотометрических систем осуществляется контроль оптических характеристик покрытий: показателя преломления, коэффициентов пропускания и отражения. Показатель преломления является функцией основных технологических параметров: температуры подложки, давления остаточных газов, скорости нанесения. Поэтому по его величине можно контролировать ход процесса, что используется при управлении технологическим процессом от ЭВМ.

Почти все УВН имеют системы газо- и водоснабжения. Первые, кроме натекаателей или систем точного напуска рабочего газа, включают в себя трубопроводы, электромагнитные клапаны, смесители, редукторы, приборы для контроля расхода газа. Система водоснабжения необходима для эффективного охлаждения диффузионного насоса, испарителей систем

распыления, поверхности вакуумной камеры. Предусмотрена также возможность прокачки горячей воды через устройства внутрикамерной оснастки и самой вакуумной камеры для дегазации паров воды и газов, которые сорбируются на поверхности и тем самым замедляют процесс достижения высокого вакуума. Системы водоснабжения включают в себя клапаны, краны, водяные реле, фильтры.

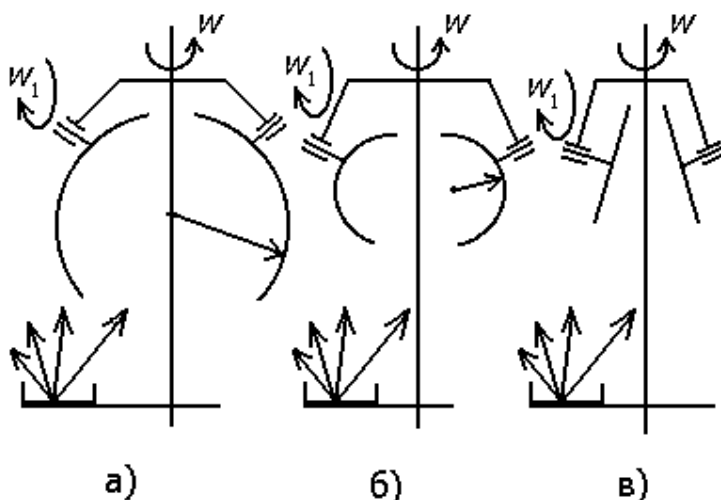


Рисунок. 10.5 - Схемы приемных сводов с планетарным вращением подложек

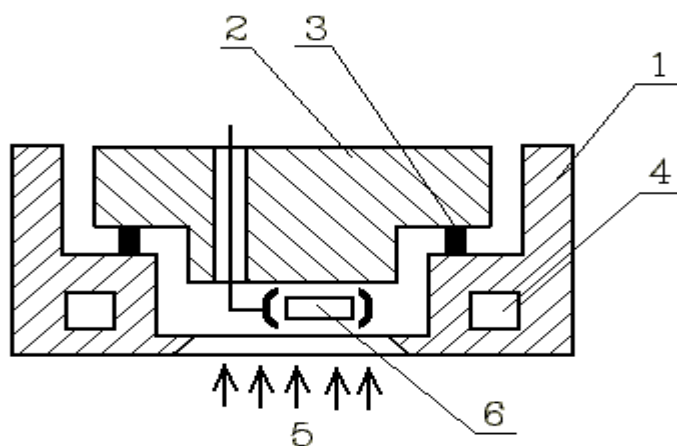


Рисунок 10.6 - Конструкция измерительной головки кварцевого измерителя

Все установки комплектуются блоками питания для систем нагрева испарителей, систем распыления, ионной очистки. Многие УВН включают в себя таймеры, реле времени, электромагнитные заслонки для быстрого перекрытия потока наносимого вещества, различные шлюзовые устройства, освещение камеры и т.п.

Вакуумные установки бывают с ручным управлением, полуавтоматические и автоматические. Две последние оснащены системами пневматики или электропривода для переключения клапанов откачки, открывания и закрывания высоковакуумного затвора, напуска воздуха в

камеру.

Качественным этапом в развитии вакуумных напылительных установок является переход от частичной автоматизации, т. е. автоматического контроля работы отдельных систем установки и автоматического поддержания некоторых параметров процесса, к полностью автоматическому управлению работой всей установки и всем технологическим процессом нанесения покрытия с его математическим моделированием, обработкой результатов измерений и корректировкой параметров. выполнение функций опытного оператора без его участия, что сводит к минимуму брак за счёт возможных ошибок оператора.

Подтверждением является следующий наглядный пример. При нанесении однослойного четвертьволнового покрытия из MgF_2 на установке с ручным управлением оператор за цикл напыления выполняет 31 операцию, связанную с переключением режимов, снятием показаний или регулированием, при общей длительности процесса менее одного часа. При изготовлении сложного светоделительного покрытия, состоящего из 43 чередующихся слоев TiO_2 и SiO_2 приходится выполнять уже 1118 операций с увеличением длительности процесса до нескольких часов. Соответствующим образом возрастает психологическая нагрузка на оператора и резко увеличивается возможность ошибки с его стороны, что приведёт к значительному снижению процента выхода годных деталей. Нанесение в ручном режиме управления установкой ста и более слоёв, необходимое при изготовлении новейших типов покрытий, представляется просто невыполнимым. Однако необдуманый подход к вопросам автоматизации процессов может привести к эффектам, которые в сумме создадут «автоматизированное производство брака». Перед введением автоматизации процессов должно быть тщательно взвешено соотношение ожидаемых выгод с затратами на приобретение нового автоматизированного оборудования, подготовку и содержание квалифицированного обслуживающего персонала, переподготовку операторов и т.д. Тем не менее, проблемы переходного периода автоматизации не должны преуменьшать революционизирующего фактора ее широкого внедрения в разработку и производство оптических покрытий.

Системы автоматического управления, используемые в УВН, обеспечивают различные уровни автоматизации, которые можно разделить на три основные группы:

- автоматизация отдельных операции на основе релейных схем при общем ручном управлении (операции переключения клапанов, блокирования, аварийного отключения, поддержание заданных значений температуры и давления и т.п.);

- автоматизация и программирование отдельных технологических процессов и операций на основе релейных схем и микропроцессоров при общем контроле со стороны оператора и его периодическом вмешательстве (автоматизация откачки, операций по обработке подложек, автоматическое нанесение слоев и т. п.);

- полностью автоматизированный программируемый процесс от момента загрузки подложек до их выгрузки с помощью центральной ЭВМ установки или ЭВМ цеха (участка) с возможностью автоматического контроля параметров, их коррекции и быстрой перенастройки на различные технологические процессы.

Автоматизация третьего уровня осуществляется на основе достаточно мощной ЭВМ (персонального компьютера) с обширной библиотекой специализированных программ управления и обработки.

Требования к конструкционным материалам вакуумного оборудования:

- минимальное давление собственных паров или минимальное газовыделение (газы в металлах появляются при их изготовлении, при плавке, сварке.)

- низкая газопроницаемость (через стекло хорошо проходит He. Керамика выделяет газа в сотни раз меньше);

- устойчивость к коррозии;

- инертность по отношению к маслам и промывочным жидкостям;

- хорошая обрабатываемость.

Для изготовления вакуумных установок широко применяют прокат, реже литье из-за большей газопроницаемости.

Из сталей наиболее широко применяют коррозионно-стойкую немагнитную сталь Х18Н10Т. Из цветных металлов применяют бескислородную медь МЗ. В качестве прокладок применяют специальные сорта резины, фторопласт, эластомеры. Вакуумная резина имеет низкую термоустойчивость 50-50 С. Лучше использовать силиконовую резину (150-200 С). Фторопласт более термоустойчив, однако при 200-300С газовыделение резко возрастает. Эластомер (витон) – 200 С. Отечественным аналогом витона является резина на основе фторокаучука марок ИРП-2043 и ИРП-345.

Вместо обычных уплотнений из резины, могут применяться подпружиненные манжеты. Часто для ввода вращения используются подшипники, чтобы избежать применения вакуумного масла можно применять валы, штоки, покрытые пленкой фторопласта. Вводы движения через сплошную стенку бывают двух разновидностей с эластичной гибкой стенкой и через жесткую вакуумно-плотную стенку камеры, обладающую проницаемостью для определенных сил (магнитных, электростатических) Вводы движения через эластичную стенку характеризуются наличием гибкой упругой перегородки. Здесь в качестве

разделительных элементов используют сифоны и мембраны, резиновые оболочки

Вакуумные клапаны и затворы служат для перекрытия вакуумных коммуникаций при давлении $10^5 - 10^{-10}$ Па. К ним предъявляются следующие требования:

- высокая герметичность ($10^{-7} - 10^{-11}$ Па. м³ с⁻¹)
- высокая вакуумная проводимость;
- высокая надежность ($5 * 10^5$ циклов «открыто-закрыто»)
- соответствие конструкции стандарту ISO
- возможность использования в автоматизированных системах.

По диаметру условного прохода D_y подразделяют на клапаны (1,6; 2,5; 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100 пт) и затворы (100, 160, 250, 400, 630 пт).

По типу привода: ручные, электропневматические, электромагнитные, электромеханические

Основные характеристики:

- диаметр условного прохода;
- рабочее давление;
- вакуумная проводимость;
- допустимое натекание;
- время срабатывания;
- наработка на отказ;
- потребляемая энергия;
- масса, габариты.

По конструкции различают клапаны с присоединительными фланцами и патрубками, расположенными напротив друг друга либо под углом 90 градусов.

По способу ввода движения в вакуум клапаны и затворы подразделяются на герметизируемые с помощью сальников либо сильфонов.

Для перекрытия вакуумных коммуникаций с $D_y > 100$ мм используются затворы. Из-за эксплуатационных преимуществ наибольшее распространение получили прямопролетные плоские затворы маятникового и шиберного типа.

Вакуумная шлюзовая система-это совокупность устройств герметизации, транспортирования и откачки, обеспечивающих перепад давлений между вакуумными камерами с различным давлением.

В зависимости от степени герметизации вакуумных камер относительно друг друга шлюзовые системы подразделяются на следующие:

- закрытые, не имеющие уплотнители и характеризующиеся полной герметизацией камер друг от друга;

-открытые, не имеющие уплотнителей и характеризующиеся отсутствием герметизации камер друг от друга;

-полуоткрытые, имеющие уплотнители и характеризующиеся частичной герметизацией вакуумных камер относительно друг друга;

-комбинированные, характеризующиеся сочетанием закрытых, открытых и полуоткрытых систем.

Закрытые шлюзовые системы

Представляют собой вакуумную шлюзовую камеру с двумя затворами, одним из которых она отделена от рабочей камеры, а другим – от атмосферы. Внутри шлюзовой камеры имеется устройство для передачи изделия в рабочую камеру.

Открытые шлюзовые системы

В открытых шлюзовых системах вакуумные камеры сообщаются между собой межкамерными каналами, через которые перемещается транспортирующее устройство. Размеры и форма последнего зависят от размеров и формы межкамерных каналов, от размеров и формы изделия. Межкамерные каналы создают частичное сопротивление поступлению воздуха из атмосферы в шлюзовые камеры и рабочую камеру. Чем меньше зазоры и чем больше длинна каналов, тем больше сопротивление потоков воздуха. Такое уплотнение называют диффузионно-щелевым. С помощью такого уплотнения можно обеспечить транспортирование изделий, имеющих постоянную форму: листы, полосы, лента, проволока, прутики и т.п.

Полуоткрытые шлюзовые системы

В таких системах применяется уплотнитель, который позволяет значительно уменьшить поток воздуха. В результате этого уменьшаются габариты шлюза, используются менее мощные откачные средства. В качестве уплотнителей используются фторопласт, капрон, резина.

Гидро- и пневмо-системы

-краны, клапаны, реле давления воды, реле прохода, фильтры;

-клапаны, редукторы, фильтры.

Вспомогательные устройства

-нагреватели (ТЭНЫ, ИК-лампы, резисторы);

-охладители (вода, LN₂, LHe, элементы Пельте);

-заслонки;

-реле времени, таймеры;

-дозаторы;

-смотровые окна;

-подсветка.

Системы контроля параметров процесса

Должны контролировать:

- степень вакуума;
- состав остаточной атмосферы;
- толщину покрытия;
- температуру подложки;
- уровень механических напряжений.

Контроль температуры подложки

-термометры сопротивления

ТСП, ТСМ, ТСН и на основе п/п $-200-+650^{\circ}\text{C}$

-термопары (ТПП, ТХК, ТХА, ТВР, ТВМ до 2200°C (ТВР)

-термоиндуктаторы (термохимические , термоиндуктаторы плавления, ЖК-индикаторы, люминесцентные термоиндикатор, т/индикаторы выпускаются в виде порошков, термолаков, красок, карандашей, пасты, таблеток.

Бывают обратимые и необратимые диапазоны измеряемых температур: $35-860^{\circ}\text{C}$

Точность $\pm 5-10^0$ -для термохимии , $\pm 0,5-1,5\%$ -для термоиндикаторов плавления, $0,1-0,5\%$ -для ЖК и люминесцентных.

Бесконтактные измерители температуры

Применяются яркостные пирометры, работа которых основана на зависимости спектральной яркости нагретых тел от температуры.

$T=200-600^{\circ}\text{C}$, $\pm 10\%$

Радиационные пирометры используют зависимость излучаемой телом энергии от его температуры. Приемниками излучения служат термопары или болометры. Диапазон измерений $-20-600^{\circ}\text{C}$.

Оборудование для осаждения покрытий из газовых и жидких сред

Сущность метода ХОГФ (CVD) состоит в том, что в терметичном реакторе в результате химических реакций в газовой фазе и на поверхности нагретых подложек осаждаются слой твердого продукта, а остатки непрореагировавших исходных веществ и газообразные продукты реакции удаляются из реактора поток газа – носителя или откачиваются вакуумным насосом.

Протекание процесса осаждения зависит от:

- температуры;
- давления;
- концентрации реагентов;
- скорости газового потока.

Существует два типа реакторов:

- реакторы атмосферного давления (РАД);
- реакторы пониженного давления (РПД).

В целом РПД намного экономически выгодно. Затраты на обработку одной пластины в РПД в 5-10 раз меньше РАД используется в основном для нанесения толстых слоев.

Свойства реагентов и реакции при ХОГФ

Таблица 11.1 - Физико-химические свойства газов

Вещество	Формула	Состояние при н.у.	Tпл, °C	Tкпл, °C
Моносилан	SiH ₄	г	-185	-112
Дихлорсилан	SiH ₂ Cl ₂	г	-122	8,3
Тетрахлорид Si	SiCl ₄	*	-68,1	57,6
Тетраэтоксисилан	Si(OC ₂ H ₅) ₄	*	-85,5	166,5
Фосфин	P ₃	г	-133,8	-87,4
Диборан	BH ₃	г	-165,5	-92,5
Аммиак	B ₂ H ₆	г	-77,8	-33,5
Закись азота	NH ₃	г	-90,8	-88,5
Гексафторид W	N ₂ O	*	-	18
Гексафторид MO	WF ₆	*	-	34
	MOF ₆			

Реакции разложения (пиролиза) и соединения реагентов:

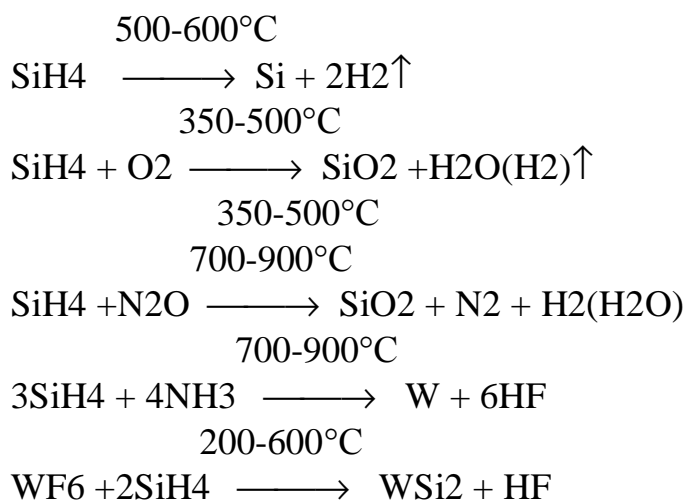


Таблица 11.2. – Обобщенные характеристики процессов осаждения

Характеристики	РАД	РПД
1) Производительность, пл/цикл	≤ 50	≤ 200
2) Уменьшение производительности при увеличении диаметра подложки	Сильное	Слабое
3) Разброс толщины слоев: $\pm\%$		
- по пластине	5-10	2
- в партии пластин	10-15	3
4) Скорость осаждения, мм/мин	20-200	5-20
5) Расход газа – носителя, м ³ /п	1,5-5	0,05

Одна из основных проблем ХОГФ – получение однородных по толщине слоев на пластинах большого диаметра.

Причины разброса толщины:

- формирование газовых потоков, завихрений
- диффузионные ограничения в зоне реакций
- неравномерный прогрев подложки
- обеднение газовой фазы активными компонентами.

В РПД обеспечивается высокая скорость диффузии (в 1000 раз выше), высокая скорость пролета газов, что обеспечивает практически постоянную концентрацию активных веществ.

Расположение пластин и схема массопереноса в РПД, разброс по толщине

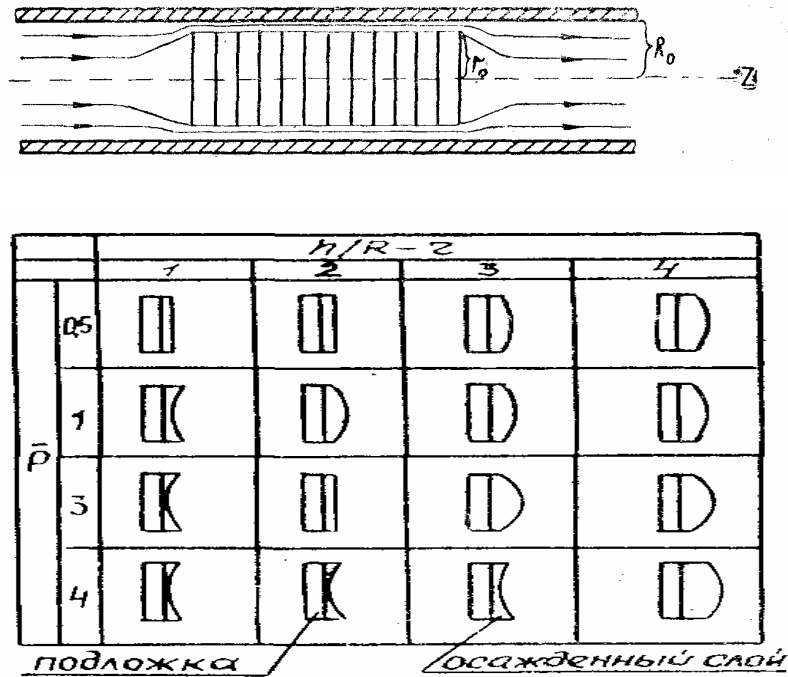


Рисунок 11.1 - Расположение пластин и схема массопереноса

Кроме того разброс может возникнуть в результате наклона пластин и нарушения коаксиальности пластин и реактора (рис.11.2)

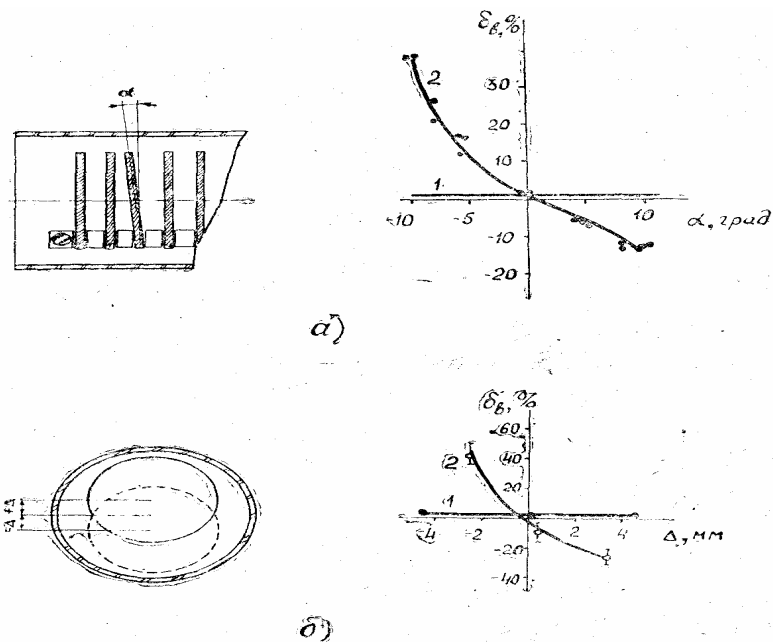
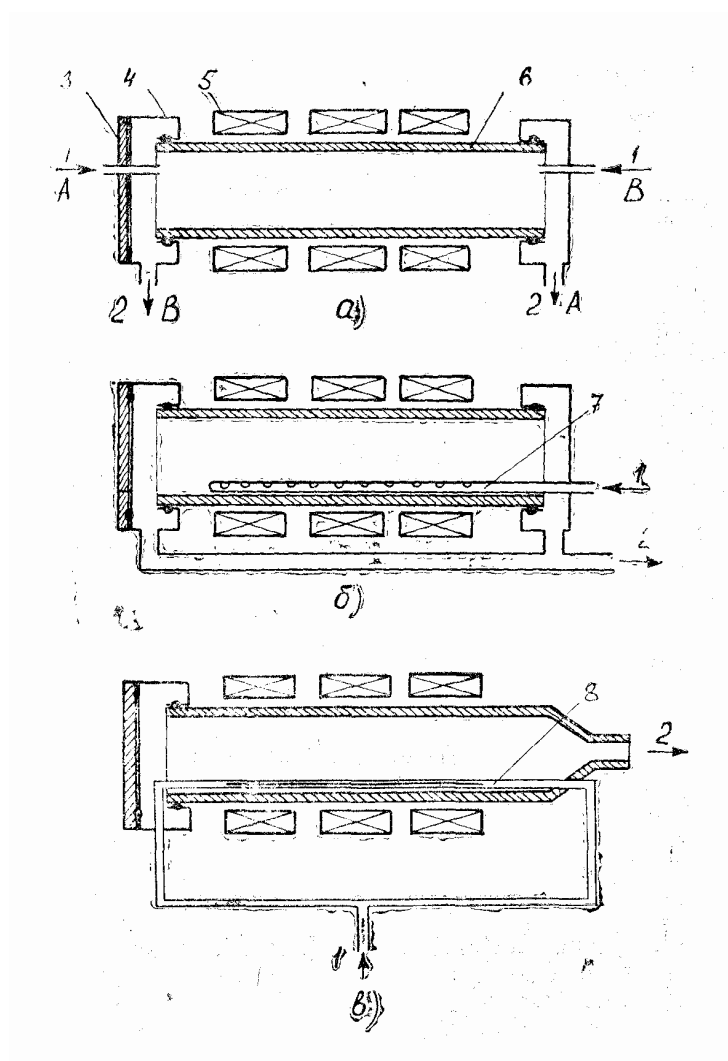


Рисунок 11.2 – Причины возникновения разброса толщины

Конструкции реакторов

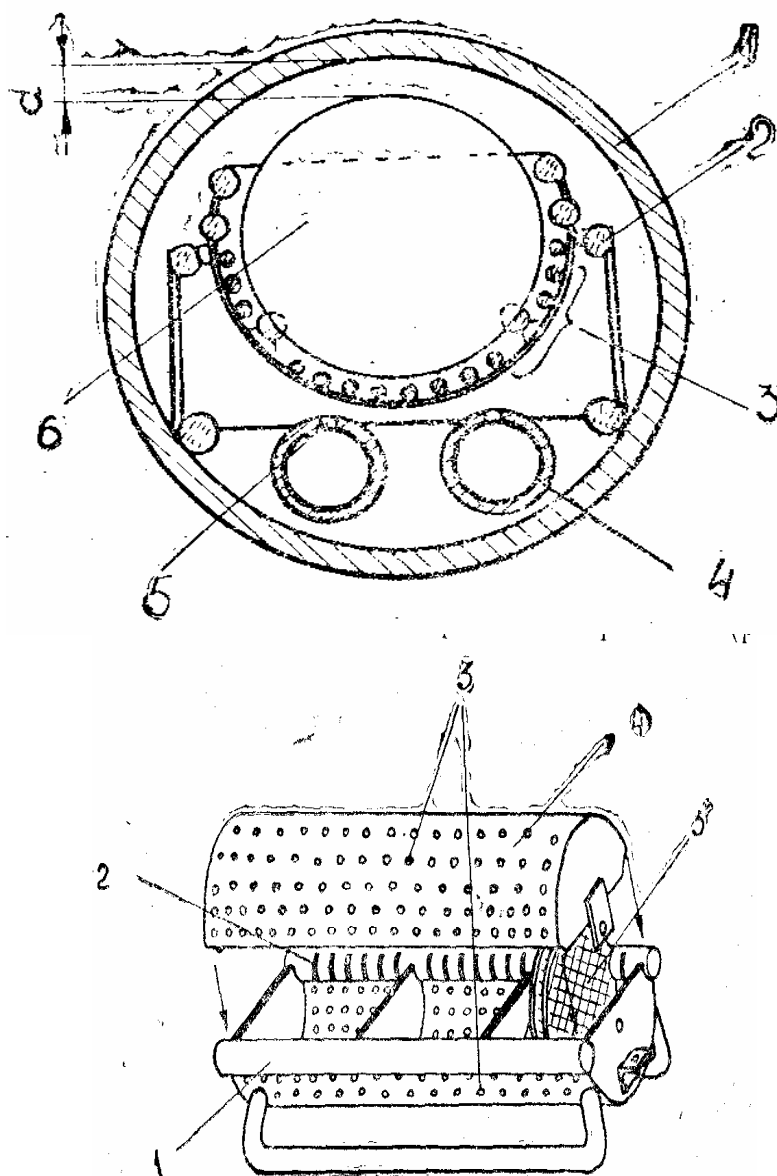
На практике для большинства процессов используют простейший реактор с односторонним вводом газов, представляющий собой цилиндрическую кварцевину (реже металлическую трубу). Газы вводятся в фланец, а в том случае, когда реагенты реагируют уже при комнатной температуре, они вводятся в реактор отдельно.

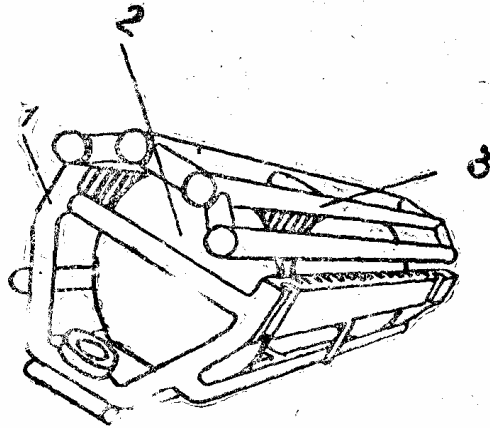
Триггерные реакторы



Для выравнивания скорости осаждения производится периодическое переключение потока газа и откачки с одного конца реактора на другой, так что реагенты пролетают рабочую зону в двух направлениях. Такая откачка позволяет уменьшить эффект истощения газовой смеси и способствует более равномерному распределению газов по реактору. Ввод газов осуществляется по щели шириной 0,13 – 0,51 мм, направленной вертикально вверх. Газы подаются с двух противоположных концов. Это устраняет перепад давления по длине трубки и способствует выравниванию концентрации реагентов по рабочей зоне.

Конструкции контейнеров





Оборудование для осаждения покрытий ХОГФ

Классификация реакторов для ХОГФ слоев SiO_2 и легкоплавких стекол представлена на рис. 11.3. Примеры различных типов конструкций реакторов для ХОГФ показаны на рис. 11.4– 9.

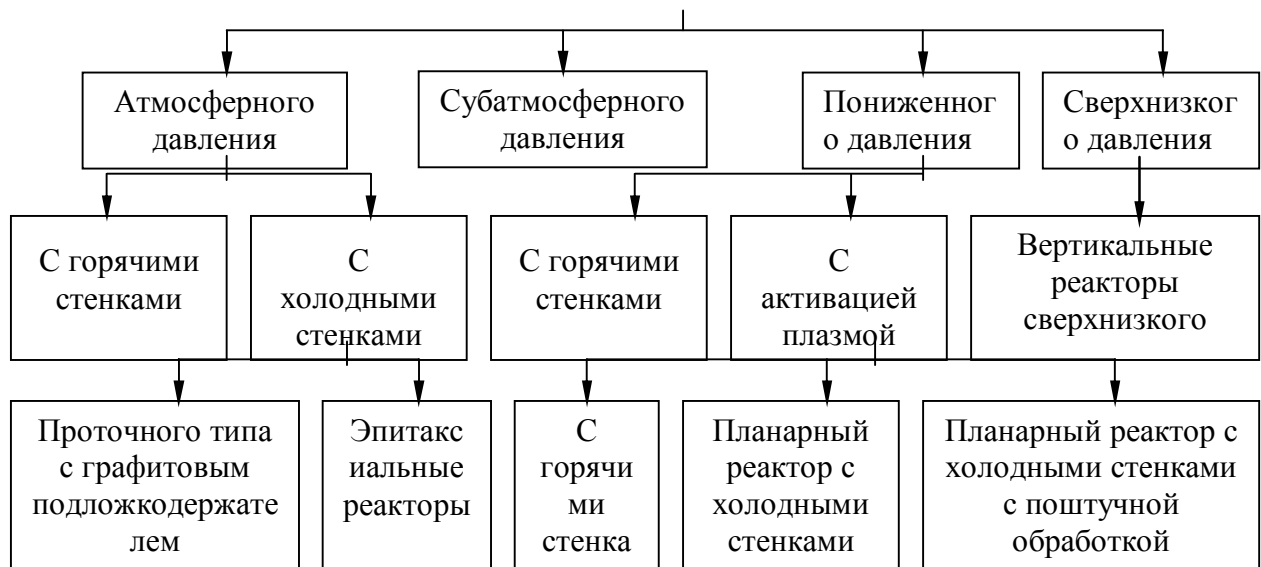


Рисунок 11.3 - Классификация реакторов для ХОГФ слоев SiO_2 и легкоплавких стекол

Реакторы для осаждения слоев

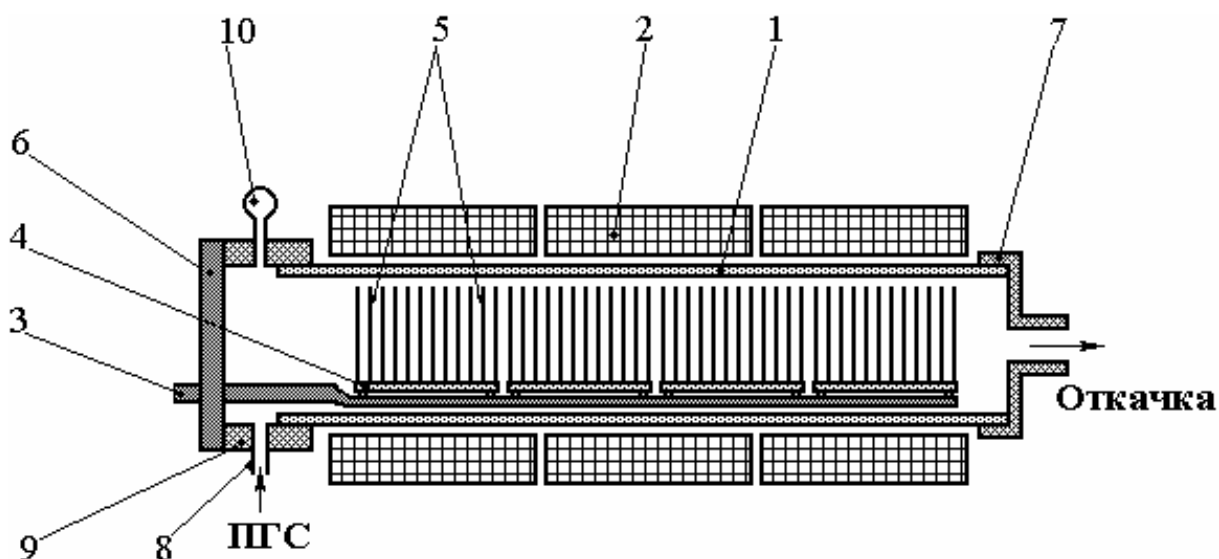


Рисунок 11.4- Трубчатый реактор пониженного давления с горячей стенкой и групповой обработкой пластин:

1 – кварцевая реакционная труба; 2– трехзонная резистивная печь; 3 – консольный загрузчик; 4 – кварцевая кассета; 5 – кремниевые пластины; 6 – затвор; 7 – задний фланец; 8 – входной патрубок; 9 – передний фланец.

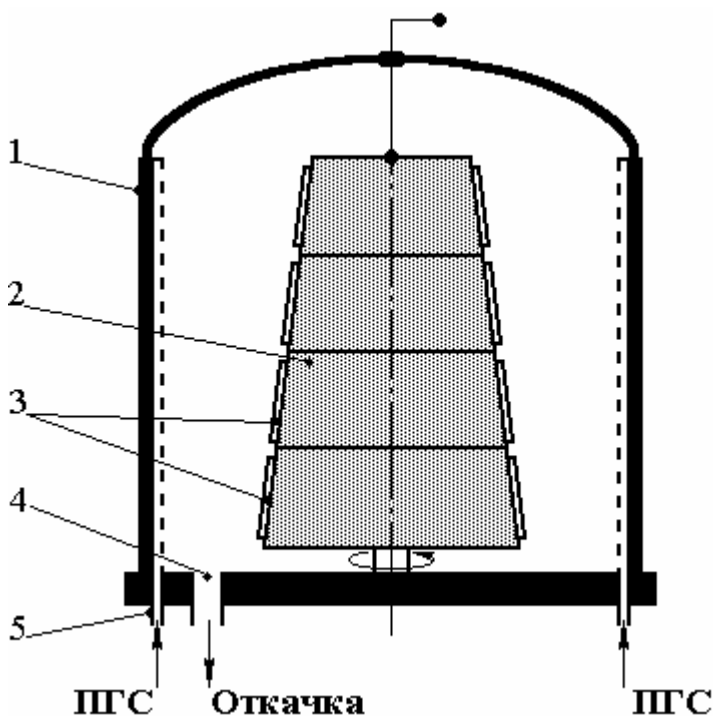


Рисунок 11.5- Реактор колпакового типа пониженного давления с холодной стенкой и групповой обработкой пластин с возможностью плазменной активации процессов осаждения и плазменной очистки внутренних поверхностей:
1 – металлический колпак; 2 – подложкодержатель/ВЧ – электрод; 3 – пластины; 4 – выхлопной патрубок; 5 – входной патрубок.

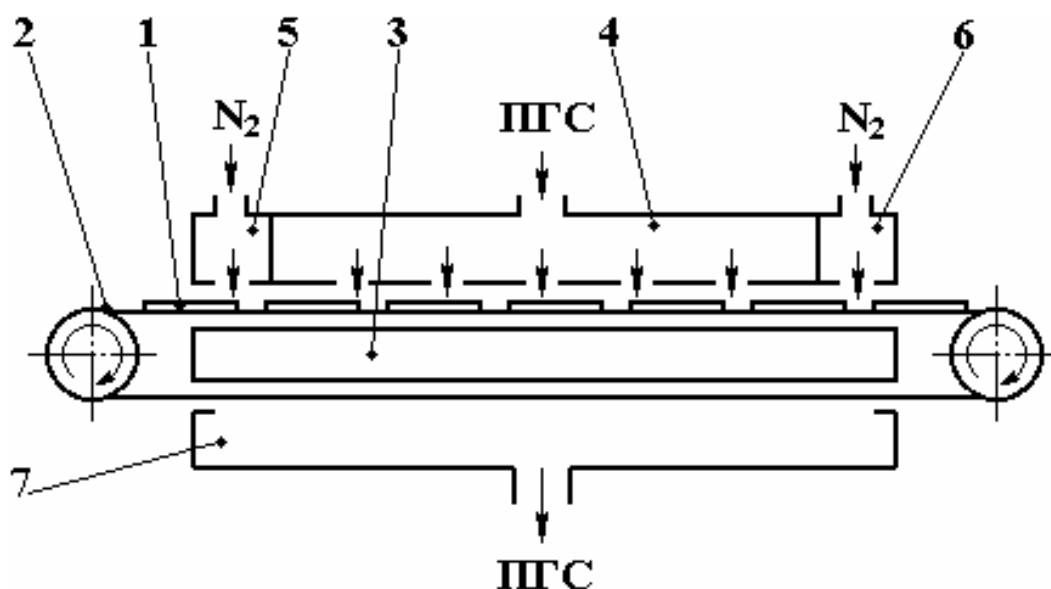


Рисунок 11.6 - Конвейерный реактор атмосферного давления с горячей стенкой и непрерывной групповой обработкой пластин: 1 – кремниевые пластины; 2 – конвейер; 3 – нагреватель; 4 – инжекторный блок; 5, 6 – азотный затвор; 7 – выхлопной коллектор.

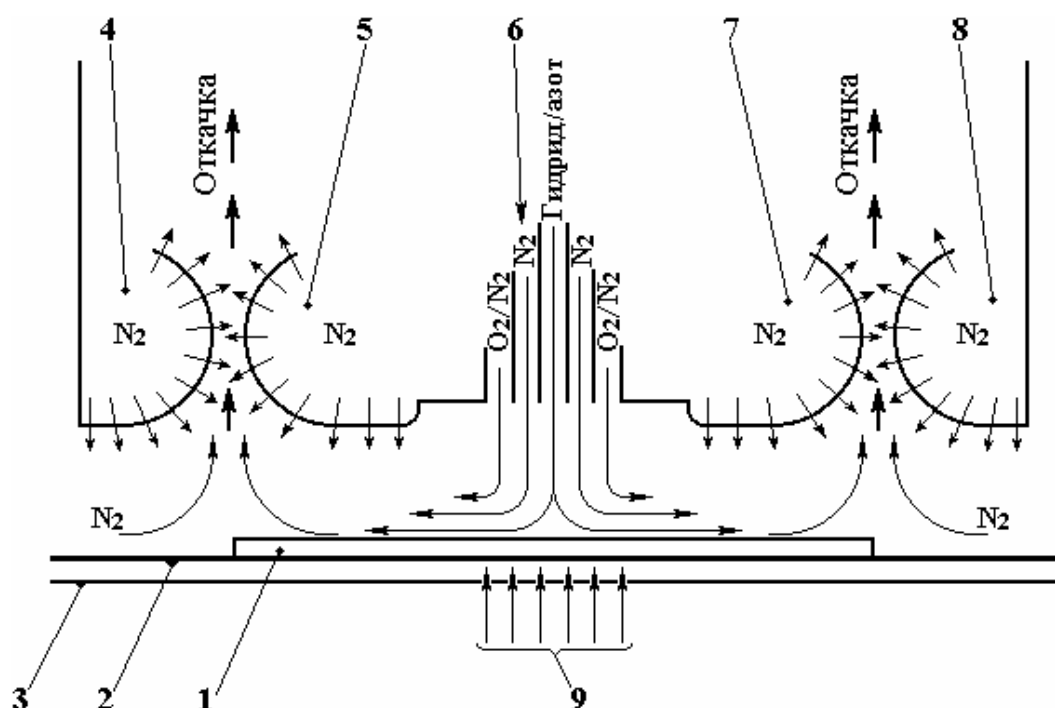


Рисунок 11.7 - Конструкция инжекторного блока для конвейерного реактора атмосферного давления фирмы Watkins - Johnson: 1 – кремниевая пластина; 2 – конвейер; 3 – нагреватель; 4, 5 – входной азотный затвор, 6 – инжектор с азотным разделением реагентов; 7, 8 – выходной азотный затвор; 9 – обдув обратной стороны пластины.

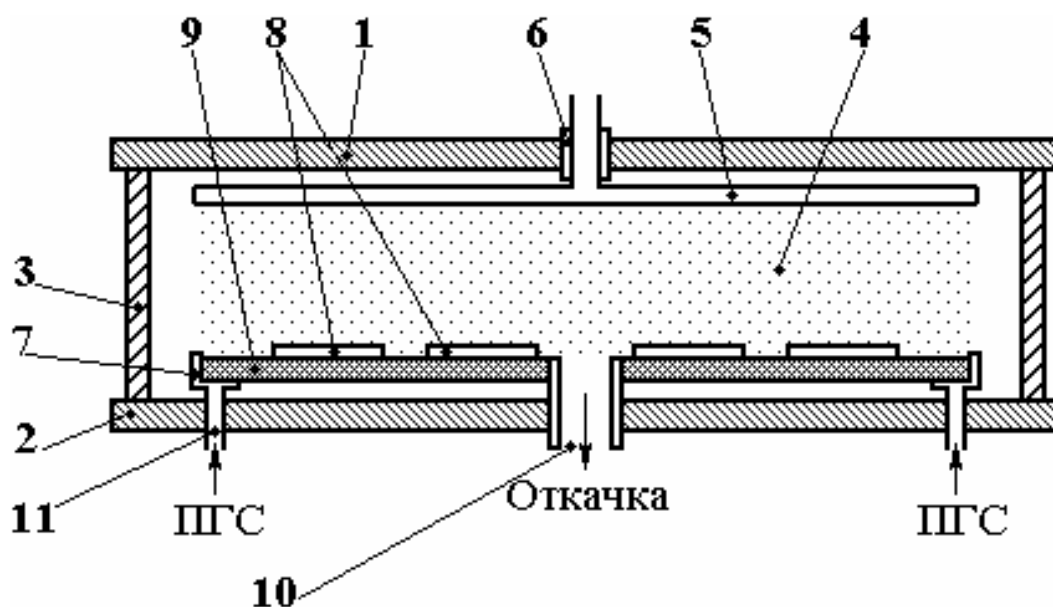


Рисунок 11.8- Планарный реактор пониженного давления с холодной стенкой и групповой обработкой пластин с возможностью плазменной активации процессов осаждения и плазменной очистки внутренних поверхностей: 1 – крышка реактора; 2 – дно реактора; 3 – стеклянный цилиндр; 4 – плазма; 5 – верхний электрод; 6 – изолированный ВЧ – ввод; 7 – нижний электрод; 8 – кремниевые пластины; 9 – нагреваемый пьедестал; 10 – выхлопной патрубок; 11 – входной патрубок.

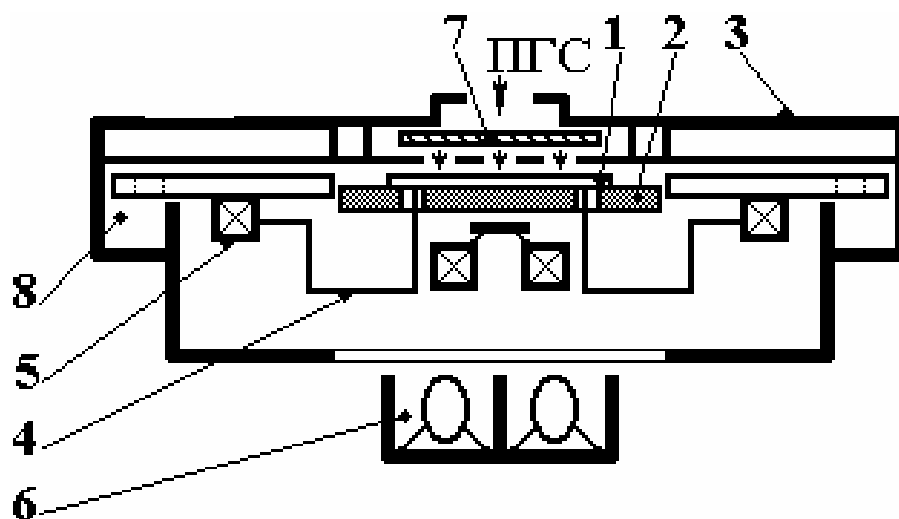


Рисунок 11.9 - Универсальный планарный реактор пониженного давления с холодной стенкой и индивидуальной (поштучной) обработкой пластин с возможностью плазменной активации процессов осаждения и плазменной очистки внутренних поверхностей: 1 – кремниевая пластина; 2 – подложкодержатель/нижний электрод; 3 – корпус реактора; 4 – штифты подъемника пластины; 5 – электромагниты; 6 – ламповый блок; 7 – верхний электрод, 8 – откачной коллектор.

Установка ХОГФ с фотонной стимуляцией

Суть фотонной стимуляции – поглощение фотонов с энергией $\approx 10\text{эВ}$ реагентами, что вызывает их прямую фотодиссоциацию с образованием атомов и активных радикалов. Это дает возможность снизить температуру в покрытиях.

Таблица 11.3 – Типы фотохимических реакций

Фотохимическая реакция	$T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$
$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \longrightarrow \text{SiO}_2$ ($\lambda = 193 \text{ нм}$)	250
$\text{SiH}_4 + \text{NH}_3 \longrightarrow \text{Si}_3\text{N}_4$ ($\lambda = 193 \text{ нм}$)	200
$\text{Si}_2\text{H}_6 \longrightarrow \text{Si}$ ($\lambda = 193 \text{ нм}$)	70

Параметры лазерного луча:

- энергия импульса – 100-200 мДж;
- длительность импульса – 10-20 нс;
- средняя мощность 100-200 Вт;
- частота повторения - $>1000\text{Гц}$;
- число вспышек - $>3 \cdot 10^7$;
- диаметр пластины – 150 мм;
- диаметр луча - 6 мм;
- длина волны – 10,6 мкм;
- мощность – 50 Вт;
- давление – $10^2 - 10^4 \text{ Па}$;
- расстояние от луча до подложек – 6 мм.

Ускорение электродных реакций при воздействии лазерного излучения может быть основано на фотолитическом (фотохимическом) стимулировании электролиза. Лазерное возбуждение может происходить как в жидкости, так и на поверхности твердого тела. При прохождении лазерного излучения через электролит происходит процесс его поглощения. Это приводит к нагреву электролита из-за возрастания амплитуды колебаний атомов и молекул. При использовании лазеров с малой длиной волны будет происходить электронное возбуждение, диссоциация и даже ионизация. Также происходит поглощение энергии на границе раздела электролит-твердое тело что приводит к следующим явлениям:

- изменению стационарного потенциала;
- увеличению скорости переноса заряда;
- сильному перемешиванию электролита из-за разности температур;
- сильному локальному кипению.

Таблица 11.4 -Основные параметры промышленных лазеров

Лазер	λ , мкм	Энергия импульса, Дж	Длительность импульса, с	Частота повторения имп., с ⁻¹	Средняя мощность, В
CO2	10,6	2	$3 \cdot 10^{-7}$	300	50
ИАГ	1,06	1	10^{-3}	100	100
Ar	0,488	2	10^{-4}	250	
ArF	0,193	0,1-0,2	10^{-8}	>1000	100-200

Преимущества воздействия лазерного излучения:

- увеличение скорости осаждения;
- улучшение качества осадков;
- селективность осаждения;

Анодное окисление основано на электродных реакция, происходящих с материалом в электролите под воздействие электрического тока. Электролиты: водные растворы борной, щавелевой, лимонной, серной, фосфорной кислот.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ТРАВЛЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СТРУКТУР

Получение элементов с субмикронными размерами требует селективного удаления отдельных участков будущей микросхемы с помощью процесса травления. Широко используемое жидкостное химическое травление обладает высокой селективностью и скоростью, однако наличие подтравливания не позволяет получить требуемое разрешение. Для технологических процессов изготовления СБИС наиболее перспективными являются методы сухого травления, которые подразделяются на ионное травление (ИТ), плазмохимическое травление (ПХТ) и ионно-химическое травление (ИХТ). На рис.14 приведена классификация процессов ионно-плазменного травления.



Рисунок 12.1 - . Классификация процессов ионно-плазменного травления

При ИТ для удаления материала используется кинетическая энергия ионов инертных газов, т.е. процесс физического разбиения ИТ подразделяется на ионно-плазменное травление при котором образцы помещаются на отрицательный электрод разрядного устройства и подвергается бомбардировке ионами, вытягиваемые из плазмы, и ионно-лучевое травление в котором образцы мишенью, бомбардируемой ионами, вытягиваемыми из автономного ионного источника (АИИ).

В ИХТ используется как кинетическая энергия ионов химически активных газов так и энергия их химических реакций с атомами или молекулами материала.

При ПХТ для удаления материала используется энергия химических реакций между ионами и радикалами активного газа и атомами (или молекулами) обрабатываемого вещества с образованием летучих стабильных соединений. В зависимости от среды, в которую помещаются образцы, ПХТ подразделяется на:

- плазменное травление: образцы помещаются в плазму химически активных газов;

- радикальное травление: образцы помещаются в вакуумную камеру, отделенную от химически активной плазмы перфорированными металлическими экранами или электрическими или магнитными полями, а травление осуществляется незаряженными химически активными частицами (свободными атомами и радикалами), поступившими из плазмы.

Наибольший интерес представляет плазмохимическое травление, т.к. оно обладает селективностью, равномерностью, и скоростью, сравнимыми с жидкостным химическим травлением, но оно не требует очистки поверхностей после обработки, позволяет одновременно травить подложки и удалять фоторезистивные маски, а также может использоваться для любых материалов.

Системы ионно-плазменного травления по способу возбуждения и поддержания плазмы подразделяются на системы с самостоятельными разрядами ВЧ и СВЧ тока и системы с искусственным поддержанием разряда с помощью термоэлектронной эмиссии, ВЧ, СВЧ электромагнитных полей.

Ионно-плазменные системы травления можно разделить по числу электрода на двухэлектродные (диодные), трехэлектродные (триодные), а также безэлектродные, в которых генерация плазмы осуществляется электромагнитными полями высокой и сверхвысокой частоты.

Системы с автономными ионными источниками могут быть как с фокусировкой так и без фокусировки ионного пучка, как с компенсацией так и без компенсации объемного заряда ионного пучка.

1.1 Диодные ВЧ системы

Диодная ВЧ системы содержит два электрода: заземленный анод, и мишень на которую подается ВЧ напряжение от генератора и помещаются обрабатываемые образцы (рис. 12.2).

В такой системе возможность травления любых материалов сочетается с простой конструкции и большой площадью мишени (до 1200 см²) на которой обеспечивается равномерная ионная бомбардировка. Давление в рабочей камере поддерживается $1,33 \cdot 10^{-1} - 13,3$ Па. Максимальная ВЧ мощность составляет 0,8 – 2,0 кВт и может регулироваться. ВЧ генераторы, используемые в промышленности, работают на частотах 1,76; 5,28; и 13,56 МГц. Напряжение между электродами составляет 0,8 – 4 кВ.

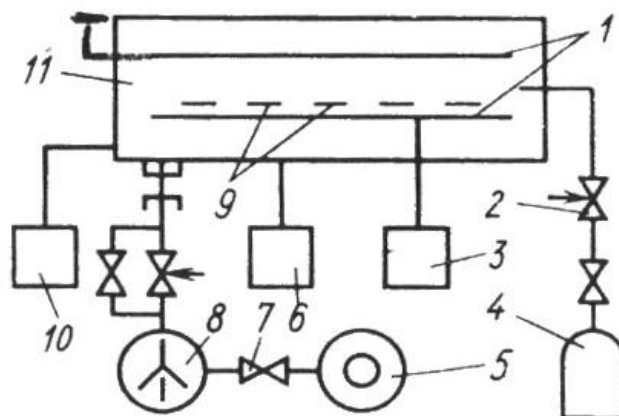


Рисунок 12.2 - Структурная схема автоматической установки плазмо-химического травления с диодной ВЧ системой

1- электроды, 2- натекатели, 3- блок управления ВЧ источником питания, 4- источник газа, 5, 8- механический и диффузионный насосы, 6- блок управления последовательностью операций, 7- вентиль, 9- подложки, 10- регулятор давления; 11- рабочая камера

Характеристической особенностью систем с ВЧ разрядом является необходимость согласования ВЧ генератора с распылительной камерой, полное сопротивление которой может меняться в широких пределах. Для осуществления согласования необходим индикатор, в качестве которого удобнее всего использовать измеритель ВЧ мощности, передаваемой из генератора в камеру. В диодных системах мишень выполняет двойную функцию: с одной стороны она является источником поддержания разряда, а с другой стороны – местом травления образцов. Поэтому в диодных системах нельзя независимо регулировать энергию ионов и их ток, проводить травление ионами низких энергий до 300 эВ, регулировать угол падения ионов. Применение диодных систем на постоянном токе ограничено, т.к. они позволяют травить только проводящие материалы.

1.2. Триодные системы

Триодная система ИТ состоит из трех независимо управляемых электродов: термокатода, анода и мишени, на которой размещаются обрабатываемые образцы (рис.16). После откачки рабочей камеры до давления 10^{-4} Па катод разогревается до температуры, достаточной для достижения высокой плотности тока термоэлектронной эмиссии. Затем в камеру напускается инертный газ до давления 0,066-0,66 Па и подается напряжение между термокатодом и анодом порядка 500 В, что приводит к зажиганию дугового разряда.

На мишень может подаваться как постоянное отрицательное напряжение при травлении проводящих образцов, так и ВЧ напряжение при травлении диэлектрических образцов. В триодных системах процессы образования плазмы и

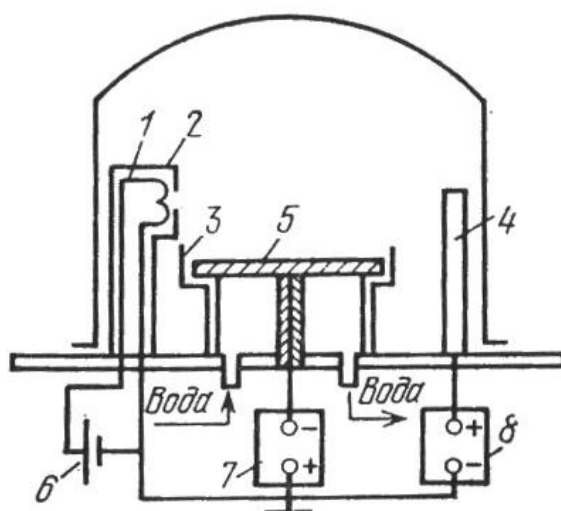


Рисунок 12.3 - Схема триодной системы ИТ
 1- термокатод, 2, 3 - экраны; 4- анод; 5- мишень; 6, 7 и 8- источники питания

травления разделены, что позволяет управлять энергией ионов с помощью напряжения на мишени, однако нельзя регулировать их угол падения. Если в диодных системах и системах с АИИ максимальная плотность ионного тока на мишени составляет 1-5 мА/см², то в триодных системах 15-20 мА/см². Это позволяет получать высокие скорости ИТ материалов – порядка 5-10 нм/с. В триодных системах трудно получить однородную плазму из-за малого размера термокатода по сравнению с холодным катодом в диодных системах, что приводит к неравномерности травления образцов по поверхности мишени. Кроме того, наличие накаливаемого термокатода не позволяет использовать при травлении материалов активные газы.

1.3. Устройства для плазмохимического травления

Установки для ПХТ можно разделить на два класса: по типу возбуждаемого в реакционной камере разряда (емкостной или индукционный) и по способу расположения в них подложек (поверхностное или объемное). Ко второму относится установка "Плазма-600", которая характеризуется безэлектродным способом создания плазмы с помощью индуктора, расположенного вокруг реактора. Подложки располагают в виде пакета с равномерным шагом вдоль оси реактора. Данная установка предназначена для удаления фоторезиста в плазме кислорода. Химически активными при этом являются возбужденные молекулы кислорода, атомарный кислород и озон. Под воздействием этих частиц происходит разложение фоторезиста на двуокись углерода и пары воды, которые удаляются из реактора вакуумным насосом. Производительность установки составляет 200-400 подложек в час.

Оборудование, выпускаемое за рубежом, предназначено для работы как в индукционном так и емкостном режиме создания разряда. Следует

отметить, что КПД при индукционном режиме выше, чем при емкостном, и достигает 95%.

1.4. Системы с автономными ионными источниками

Системы ИТ с автономными ионными источниками по сравнению с ионно-плазменными системами обладают следующими преимуществами: уменьшение радиационного воздействия заряженных частиц и фотонов на обрабатываемые структуры в результате отделения рабочей камеры от источника; уменьшение загрязнений образцов инородными частицами за счет устранения процессов обратной диффузии и рассеяния при высоком вакууме в рабочей камере (10^{-3} Па); возможность независимой регулировки угла падения, энергии и тока ионов, что позволяет контролировать и управлять профилями травления микроструктур; возможность наклона и вращения мишени с образцами, позволяющая улучшить равномерность травления и устранить некоторые топографические дефекты.

На рис.12.4 показана схема установки ИТ Microetching, разработанной фирмой Veeco Instr. Inc. на базе АИИ Кауфмана фирмы Thomsom CSF. Эта установка часто используется при травлении различных материалов. Ионизируемый инертный газ напускается через натекатель в камеру ионного источника, в котором при давлении порядка 0,1-1 Па зажигается дуговой разряд между вольфрамовым термокатодом и окружающим его цилиндрическим анодом, создающим радиальное электрическое поле, служащее для ускорения электронов. Для увеличения эффективности ионизации на разрядный промежуток накладывается аксиальное магнитное поле, которое заставляет электроны двигаться по циклоидальным траекториям. Стенки анода находятся под высоким положительным потенциалом (до нескольких киловольт), что приводит к ускорению ионов и вытягиванию их через систему из трех молибденовых сеток, обеспечивающую получение хорошо сфокусированного ионного пучка диаметром 7,5-10 см с 5%-ной неравномерностью плотности тока. Из компенсатора объемного заряда, представляющего раскаленную вольфрамовую нить, в ионный пучок эмиттируются электроны для компенсации его объемного заряда, что позволяет проводить травление непроводящих материалов. Плотность ионного тока пучка может меняться от 0,3 до 2,5 мА/см², ускоряющее напряжение - от 0 до 2 кВ, угол расхождения пучка составляет 7-10°, а расход инертного газа 1,0— 1,5 см³/мин.

К недостаткам источников с накаливаемым катодом относится трудность использования химически активных рабочих веществ, что существенно ограничивает их технологические возможности. Например, применение в источниках Кауфмана с прямонакальным катодом в качестве рабочих веществ фторсодержащих соединений уменьшает срок службы источника с 40 до 2 ч.

С целью устранения отмеченных недостатков применяют источники ионов химически активных соединений, в которых накаливаемый катод

отсутствует, например, бессеточные источники ионов, в которых области образования ионов и их ускорения совмещены, и источники ионов, в которых газоразрядная плазма образуется в ВЧ или СВЧ полях.

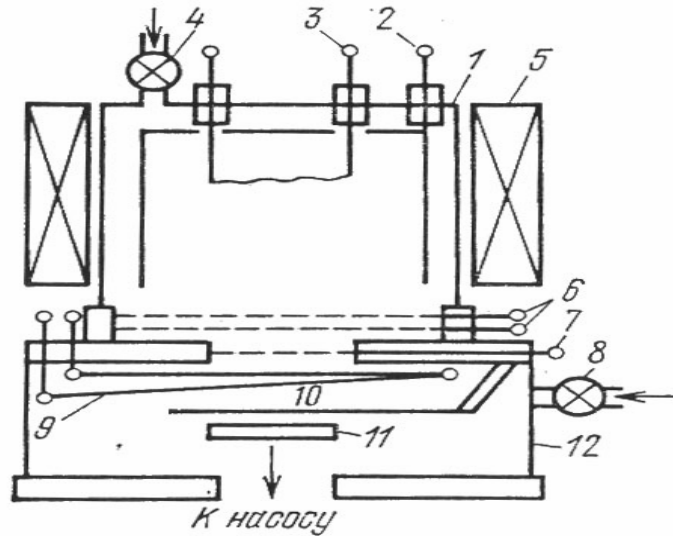


Рисунок 12.6 - Схема установки ИТ:

1- камера ионного источника; 2- анод; 3- термокатод; 4, 8- натекатели; 5- электромагнит; 6- ионно-оптические сетки; 7- ускоряющая сетка; 9- нейтрализатор; 10- заслонка; 11- водоохлаждаемая мишень; 12- рабочая камера

Из бессеточных источников наибольшее распространение получили источники, в которых ионы образуются и ускоряются в скрещенных электрическом и магнитном полях. В этих источниках нет ограничения плотности тока пучка ионов. Энергия ионов определяется разностью потенциалов между местом образования иона внутри ускоряющего промежутка и потенциалом обрабатываемого объекта. Созданы три типа таких источников: ускорители с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП), ускорители с анодным слоем (УАС) и источники с холодным катодом "Радикал". Источники типа УЗДП получили название Холловских ускорителей. Принципиальные схемы этих источников представлены на рис. 12.7.

Контроль скорости удаления материала или толщиной пленки непосредственно в процессе ионно-плазменного травления (ИПТ) необходим потому, что этот процесс обладает низкой селективностью и не прекращается на границе раздела между пленкой подвергаемого травлению материала и пленкой подслоя (или подложкой). Если процесс ИПТ своевременно не остановить, то происходит удаление материала подслоя или подложки, приводящее к ухудшению электрофизических характеристик и браку обрабатываемых микроструктур.

Все методы контроля скорости удаления материалов и толщины пленок в процессе ИПТ можно разделить на две группы:

-прямые методы, в которых на измерительный преобразователь (ИП) (чувствительный элемент, датчик) воздействуют атомы или молекулы подвергаемого ИПТ материала;

-косвенные методы, в которых на ИП воздействуют частицы, не являющиеся атомами или молекулами подвергаемого ИПТ материала и не содержащие атомов или молекул этого материала.

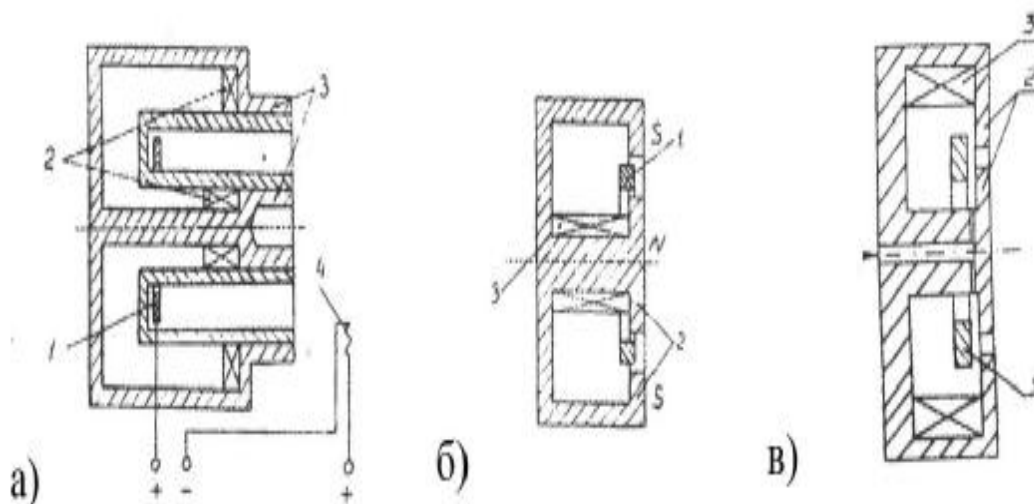


Рисунок 12.7 - Принципиальные схемы ускорителя с протяженной зоной ускорения (а), ускорителя с анодным слоем (б), источника “Радикал” (в):
1- анод; 2- катод; 3- соленоид; 4- катод-нейтрализатор.

1.5. Контроль скорости удаления материала и толщины пленок в процессе ионно-плазменного травления

Прямые методы контроля подразделяются на три подгруппы, в которых: пленка материала, подвергаемого ИПТ, воздействует на ИП в течение определенного времени; ИП реагирует на проходящий через него поток распыляемого материала; ИП реагирует на удары распыляемых частиц. Две подгруппы, в которых: частицы (воздействующие на ИП) самостоятельно образуются в распылительной камере и создаются от специального источника. К первой подгруппе относятся методы оптической спектроскопии и вторичной электронной эмиссии под действием ионной бомбардировки, а ко второй - фотометрические, интерферометрические, поляриметрические, оже-спектроскопические, электроннолучевые, рентгенолучевые и радиоактивные методы.

В основе резистивного метода контроля лежит зависимость между толщиной и сопротивлением проводящей пленки постоянному току. Резистивный метод можно использовать для контроля ИПТ токопроводящих пленок. Для этого на «свидетель», представляющий собой отрезок диэлектрической или полупроводниковой подложки с двумя контактными площадками, необходимо нанести металлическую пленку такой же толщины, как и на рабочих подложках. Толщина контактных площадок должна быть

значительно больше толщины подвергаемой ИПТ металлической пленки. Для проведения ИПТ рабочие подложки и «свидетель» помещаются на мишень, а от контактных площадок «свидетеля» создаются электрические выводы к схеме измерения сопротивления. При полном удалении металлической пленки со «свидетеля» измерительный прибор покажет бесконечное сопротивление и процесс ИПТ может быть остановлен.

К ограничениям резистивного метода контроля следует отнести низкую точность измерения сопротивления в процессе травления и применимость только к проводящим пленкам.

Метод кварцевого резонатора основан на измерении изменения резонансной частоты кварцевого кристалла при травлении пленок материалов. При измерениях в газоразрядной плазме пьезоэлектрические кварцевые кристаллы должны быть тщательно экранированы от электрических полей и заряженных частиц. Поэтому очевидно, что нельзя проводить контролируемое ИПТ пленок непосредственно на кварцевом кристалле. Определять скорость ИПТ можно только по измерению скорости осаждения распыляемой плёнки на экранированный кварцевый датчик. К основным недостаткам метода кварцевого резонатора относятся малый срок службы дорогих кварцевых кристаллов и значительное изменение частоты измерительного кристалла по сравнению с частотой эталонного.

К оптическим методам контроля относятся: фотометрические, использующие измерения величины отражения или пропускания металлических, полупроводниковых и диэлектрических пленок; интерференционные, использующие явление интерференции в системе пленка - подложка; поляриметрические, основанные на измерении поляризации отраженного пленками света; спектроскопические, основанные на измерении характеристического излучения распыляемых частиц возбуждаемого в газоразрядной плазме.

Фотометрический метод можно применять для контроля окончания процесса ИПТ металлических пленок, нанесенных на диэлектрические подложки, так как после стравливания хорошо отражающей металлической пленки значение измеряемого сигнала резко уменьшается. Это изменение можно выделить на фоне помех и наводок, вносимых излучением плазмы. На рис. 19,а показана диодная система ИПТ с устройством для контроля толщины обрабатываемых пленок на основе гелий-неонового лазера. Луч лазера направляется в вакуумную камеру через смотровое окно и при помощи зеркал и микрометрических винтов юстируется на поверхности образца, подвергаемого травлению. Интенсивность отраженного луча регистрируется фотодиодом.

На рис. 12.8,б показано изменение коэффициента отражения во времени при ИПТ пленки Au толщиной 100 нм на стеклянной подложке.

Устройство на рис.12.8,а может применяться и для интерференционного контроля толщины диэлектрических пленок в многослойных структурах, основанного на подсчете интерференционных экстремумов от системы пленка - подложка (или подслоя).

Методы поляриметрии редко применяют для определения толщин пленок в процессе их нанесения или травления в вакууме, так как они требуют многочисленных расчетов и графических построений.

Метод оптической спектроскопии (рис.12.9) дает хорошие результаты при контроле скорости ИПТ различных материалов. При удалении материала поверхностного слоя интенсивность излучения его атомов резко падает, что позволяет определять границы слоев различных материалов. Метод оптической спектроскопии может применяться для контроля процессов ИПТ в различных системах травления.

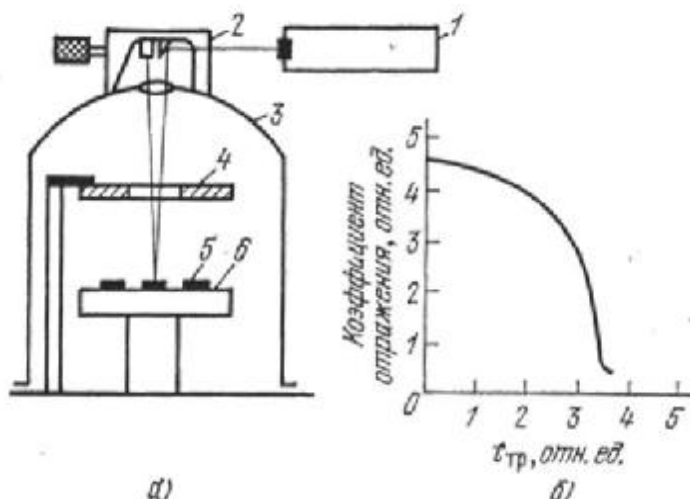


Рисунок 12.8 - Схема фотометрического метода контроля (а) и зависимость коэффициента отражения золотой пленки от времени ИПТ (б):
1-лазер;2- система отклонения луча лазера; 3- вакуумная камера; 4- анод;
5- образцы; 6- мишень

В ионно-лучевых системах с электронными пушками для определения толщины тонких пленок и скорости их ИТ можно использовать метод оже-спектроскопии основанный на регистрации оже-спектров, т.е. первых производных функций энергетического распределения отраженных от пленок электронов. Основные трудности метода заключаются в обеспечении воспроизводимости положения электронного и ионного пучков на поверхности подвергаемого травлению образца и в поддержании необходимой чистоты применяемого рабочего газа.

1.6. Состав и характеристики оборудования

В состав оборудования для ионно-плазменного травления материалов входят следующие основные функциональные системы:

- система травления, служащая для проведения обработки пластин и состоящая из рабочей камеры и расположенных внутри нее или присоединенных к ней снаружи электродов, экранов, подложкодержателей и автономных источников стимулирующих воздействий и химически активных

частиц (ХАЧ). При использовании в процессе травления ХАЧ рабочая камера обычно называется реактором;

- газовая система, служащая для подачи требуемого потока газа (пара) или газовой смеси в рабочую камеру и в автономные источники стимулирующих воздействий и ХАЧ и состоящая из нескольких каналов, в состав которых входят фильтры, трубы, испарители, вентили, клапаны, измерители и регуляторы расхода газа, коллекторы и стабилизаторы давления;

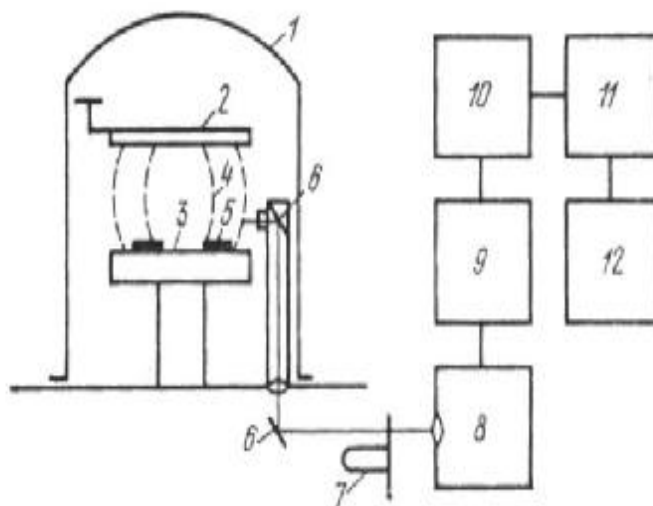


Рисунок 12.9 - Схема спектроскопического метода контроля:

1- вакуумная камера, 2- анод, 3- мишень, 4- плазма, 5- образцы, 6- зеркала, 7- модулятор, 8- монохроматор, 9- фотоумножитель, 10 – предусилитель, 11- фазочувствительный усилитель, 12- измерительный прибор или самописец.

- вакуумная система, служащая для обеспечения требуемого давления остаточных и рабочих газов в технологической и шлюзовой камерах, автономных источниках стимулирующих воздействий и ХАЧ и состоящая из вакуумных насосов, трубопроводов, клапанов, измерителей и регуляторов давлений и скоростей откачки, азотной ловушки, системы ее регенерации, фильтров или станций для очистки насосного масла, скрубберов или нейтрализаторов выхлопных газов;

- система возбуждения и поддержания плазмы разряда в рабочей камере, а также других стимулирующих воздействий в автономных источниках, состоящая из генераторов и источников электрических и магнитных полей, кабелей или волноводов, измерителей и регуляторов подводимой мощности, согласующих устройств;

- система загрузки-выгрузки пластин, транспортирования и позиционирования их внутри установки, состоящая из передающей и приемной кассет, устройств загрузки и перемещения пластин, шлюзовой камеры, подложкодержателей и прижимных устройств, датчиков положения пластин на различных позициях;

- система термостатирования испарителей, участков газовых каналов, электродов, подложкодержателей и стенок камер, служащая для измерения и регулирования их температуры и состоящая из термостатов, труб, хладо- и теплоагентов, устройств их перекачки, подачи и распределения, измерителей и регуляторов температуры;

- система контроля момента окончания процесса травления функционального слоя (времени травления), состоящая из индикаторов на основе эмиссионно-спектрального, лазерного интерферометрического или масс-спектрометрического методов, оптических и электронных устройств, а также специализированных микропроцессоров для обработки полученных сигналов по соответствующему алгоритму.;

- система управления, служащая для управления перечисленными выше системами контроля режимов их работы и исправности входящих в них устройств и состоящая из управляющей ЭВМ с программным обеспечением с клавиатурой ввода команд и дисплея.

К конструкционным характеристикам оборудования относятся: форма, материалы, размеры и взаимное расположение функциональных узлов и систем в составе установки, а также отдельных элементов в составе этих узлов и систем.

К основным характеристикам оборудования ВГПТ относятся:

1) рабочее давление (p) и диапазон его возможного изменения (Δp);
2) расход рабочего газа (смеси) (Q) и диапазон его возможного изменения (ΔQ);

3) удельная мощность разряда ($P_{уд}$) и диапазон ее возможного изменения ($\Delta P_{уд}$) (в случае разряда постоянного тока характеристиками процесса являются сила тока (I_p) и напряжение разряда (U_p), а в случае радиационно-стимулирующего воздействия из автономного источника – сила тока и энергия пучка);

4) температура подложкодержателя (T_n) и диапазон ее возможного изменения (ΔT_n) (температура обрабатываемой пластины $T_{пл}$ в зависимости от теплового контакта может сильно отличаться от температуры подложкодержателя);

5) индукция магнитного поля (B) и диапазон ее возможного изменения (ΔB);

6) напряжение смещения на подложкодержателе ($U_{см}$) и диапазон его возможного изменения ($\Delta U_{см}$) (в случае использования специального источника смещения);

7) угловая скорость (ω) или скорость перемещения ($v_{пер}$) подложкодержателя и диапазоны их возможного изменения ($\Delta \omega$) и ($\Delta v_{пер}$) (в случае, если размеры зоны равномерного травления меньше размеров обрабатываемой пластины);

8) углы наклона подложкодержателя относительно потока химически активных частиц (γ) и (или) радиационно-стимулирующего воздействия (α) и диапазоны их возможного изменения ($\Delta \gamma$, $\Delta \alpha$);

9) остаточное давление в рабочей камере ($p_{ост}$) и диапазон его возможного изменения ($\Delta p_{ост}$);

10) частота электрического поля (f) и диапазон ее возможного изменения (Δf);

11) длительность импульса ($t_{и}$) и период между импульсами ($t_{м.и}$) для электрического поля или радиационно-стимулирующего воздействия.

Первые четыре характеристики относятся ко всем видам оборудования, а остальные – только к отдельным группам. Оператор или управляющая ЭВМ контролируют значение характеристик с помощью измерительных приборов и поддерживают их в требуемых технологических допусках с помощью прецизионных регуляторов.

К эксплуатационным параметрам оборудования относятся быстродействие, цикловая производительность, среднее время наработки на отказ.

Сборочное оборудование

Наиболее распространенными промышленными способами разделения пластин на кристаллы являются скрайбирование пластин с последующей ломкой их, а также резка диском с наружной режущей кромкой.

13.1 Установки для разделения пластин

Оборудование для разделения пластин скрайбированием.

Скрайбирование заключается в нанесении на поверхность полупроводниковой пластины системы взаимно перпендикулярных рисок. Вдоль рисок формируются зоны концентрации напряжений, поэтому приложение изгибающих усилий приводит к разлому пластины вдоль рисок на отдельные кристаллы. В качестве инструмента для нанесения рисок используются алмазные резцы, лазерный луч.

Установка «Алмаз-М» (рис.13.1) предназначена для скрайбирования полупроводниковых пластин алмазными резцами, которые закрепляются в резцовой головке 3.

Пластина крепится вакуумом на предметном столике 4, соединенном с приводом шаговых перемещений. Настройка шага скрайбирования и ориентация пластины проводятся с помощью проектора 1. Проектор совместно с кожухом 2 закреплен на стойках, смонтированных в основании 6. На лицевой стороне основания расположен пульт управления 5. Основные технические данные полуавтомата «Алмаз-М»:

Максимальный ход подачи предметного столика .	85 мм
Интервал скрайбирования	20. ..100 мм
Шаг скрайбирования: двумя резцами с интервалом:	
0,01 мм	0,01...0,99 мм
0,02 мм „ . .	0,02. ..19,98 мм
одним резцом с интервалом	
0,04 мм	0,04.. .39,96 мм
Погрешность скрайбирования по шагу	0,005 мм
Неперпендикулярность нанесения рисок скрайбирования на длине 80 мм, не более	0,006 мм
Наибольшая погрешность шага скрайбирования на длине 80 мм, не более	0,1 мм
Скорость подачи	4 мм/с

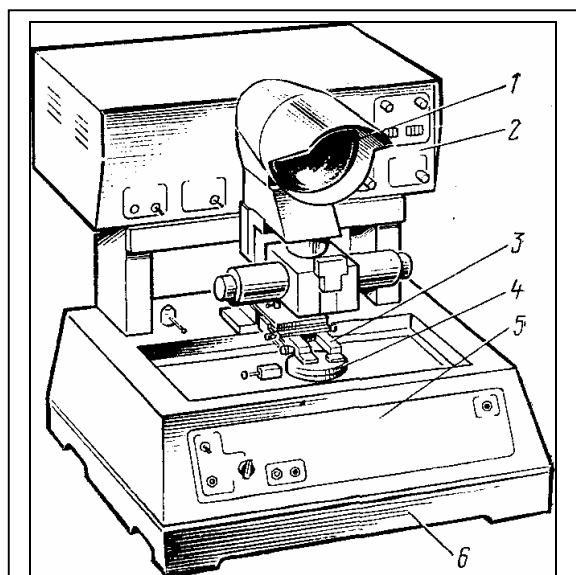


Рисунок 13.1 - Установка скрайбирования пластин «Алмаз-М»

Пределы плавной регулировки скорости перемещения резцовой головки	20.. 75 мм/с
Усилие нагрузки резца	0,1.. 2,5 Н

Кроме механического скрайбирования алмазным резцом используется также скрайбирование полупроводниковых пластин лучом лазера. Этот метод позволяет уменьшить число микротрещин и сколов на рабочей поверхности, может использоваться для скрайбирования пластин с любыми покрытиями, обеспечивает не только надрезание пластин на различную глубину, но и их сквозное разделение.

В современных установках лазерного скрайбирования используются твердотельные лазеры на алюмоиттриевом гранате.

Основные параметры установки лазерного скрайбирования приведены в табл. 13.1.

К недостаткам лазерного скрайбирования относится сложность и высокая стоимость оборудования, необходимость защиты рабочей поверхности от микрочастиц, разлетающихся из зоны расплава при лазерном воздействии.

Для разделения скрайбированных пластин на кристаллы используются механические устройства с валиком, гибкой лентой или сферической опорой.

Таблица 13.1 - Основные параметры установки лазерного скрайбирования

Частота следования импульсов, кГц	Диаметр пятна, мкм	Ширина и глубина риски, мкм	Зона термического воздействия при	Скорость скрайбирования и сквозного
1...10	25	30; 50	50... 75 До 120	50... 75 5. ..10

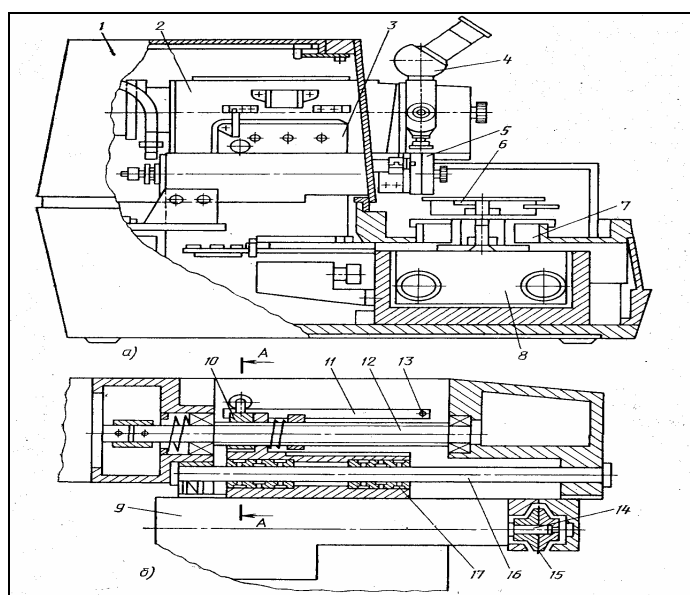


Рисунок 13.2 - Установка разделения пластин алмазными кругами

Установка разделения пластин алмазными кругами. Метод разделения пластин алмазными отрезными кругами имеет ряд преимуществ по сравнению со скрайбированием. Он позволяет разрезать пластины с многослойными покрытиями и получать кристаллы больших размеров с высокой точностью, минимальным количеством сколов и ровными, перпендикулярными торцами, облегчающими автоматическую сборку. С помощью отрезных кругов можно разделять пластины из материалов, не поддающихся скрайбированию, например из сапфира, а также пластины больших размеров и соответственно большей (до 0,8 ... 1 мм) толщины.

На рис. 13.2,а показаны компоновка и основные узлы установки резки алмазными кругами модели 04ПП100М. Установка содержит корпус 1, шпиндельный узел 2, каретки продольной 8 и поперечной 3 подачи, вакуумный стол 7 с насадкой 6, узел совмещения 4 и систему 5 подачи смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ). На валу 14 шпинделя 9 (рис. 13.2,б) закреплен алмазный круг 15. Шпиндель 9 закреплен на каретке поперечной подачи 3, связанной с электродвигателем через ходовой винт 12 и гайку 10. Каретка перемещается по цилиндрическим направляющим 16. Для уменьшения трения в направляющих во втулках 17 каретки выполнены каналы, по которым в зазор между втулками и направляющими подается сжатый воздух. Он не только создает между ними воздушную прослойку, но и препятствует попаданию в направляющие продуктов резания. Каретки продольных перемещений 8 имеют аналогичные направляющие.

Перемещения кареток осуществляются приводами от шаговых электродвигателей, что обеспечивает широкий диапазон изменения подачи. Движение каретке продольной подачи передается от электродвигателя эластичным зубчатым ремнем.

Для повышения точности размеров получаемых кристаллов в установке применен узел коррекции поперечного перемещения шпинделя (рис. 13.2,в). Узел включает коррекционную линейку 11 (рис. 2.2,б), Г-образный и прямой рычаги 18 и 21, на концах которых закреплены ролики 19, 20, притянутые к линейке пружиной 22. В случае, если систематическая ошибка ходового винта 12 превышает допустимое значение, линейку 11 поворачивают вокруг оси 13 (рис. 2.2,б), создавая необходимый доворот гайке 10 по отношению к винту 12.

Перед началом работы узел совмещения 4 (рис. 2.2,а) настраивают относительно линии отрезки, для чего на вакуумном столике 7 закрепляют пробную пластину и нарезают ее. Затем визирную линию оптического устройства совмещают с линией отрезки. В дальнейшем визирная линия служит базой при ориентации рабочих пластин. Рабочую пластину 23 (рис. 2.2,г) закрепляют совместно с металлическим кольцом 25 на адгезионной

пленке 24 и устанавливают на вакуумном столике. При этом металлическое кольцо притягивается к постоянным магнитам 26, встроенным в основание столика, и пленка облегает конус столика. В результате алмазный круг при надрезании пластин не касается пленки и кольца.

После установки глубины реза и величины шага в автоматическом режиме производится резка пластины в одном направлении. Затем стол с пластиной поворачивают на 90°, ориентируют пластину по визирной линии и производят резку в перпендикулярном направлении.

Узел крепления алмазного круга и подачи СОЖ в зону резания показан на рис. 13.3,а. Через окно 5 в корпус 3 подается де-ионизованная вода. Она захватывается периферийной поверхностью оправки 2 с кругом 1 и разгоняется по подводному каналу 4. Поток воды постепенно обжимается

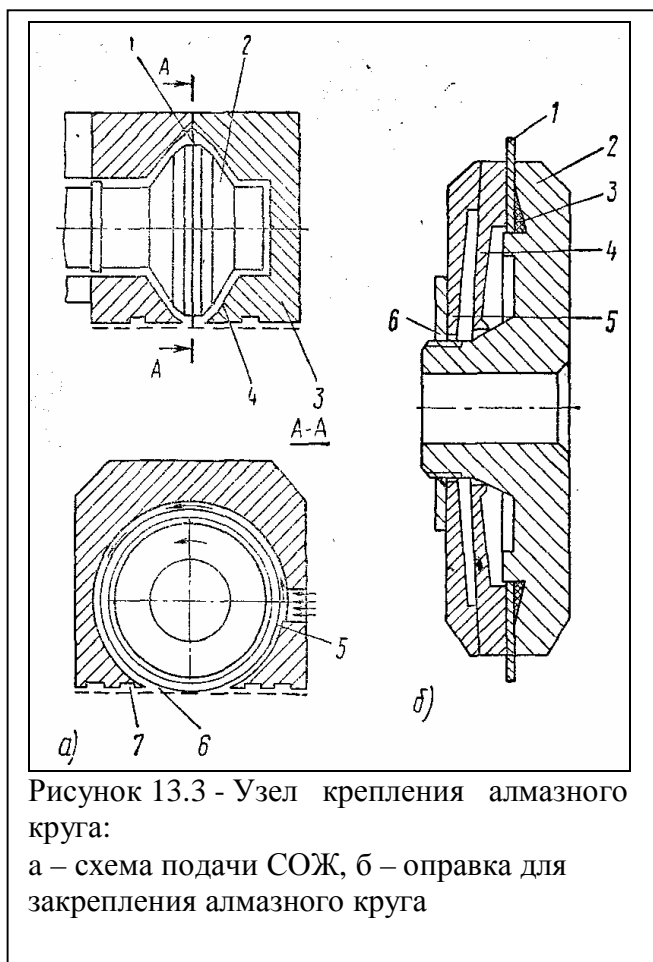


Рисунок 13.3 - Узел крепления алмазного круга:

а – схема подачи СОЖ, б – оправка для закрепления алмазного круга

спиральной поверхностью канала, и скорость его возрастает. При выходе из окна 6 поток имеет скорость, близкую к линейной скорости круга. В зоне карманов 7 происходит резкое снижение скорости и соответствующее повышение давления жидкости за счет сопротивления течению потока, создаваемого наружной поверхностью корпуса. В результате СОЖ глубоко проникает в зону резания, что позволяет увеличить подачу до 170 ...320 мм/с при частоте вращения круга 5×10^4 мин⁻¹ и глубине врезания 250 мкм.

Оправка для закрепления алмазного круга (рис.13.3,б) содержит корпус 2, на который последовательно устанавливаются кольцевая эластичная прокладка 3, алмазный отрезной круг 1, мембрана 4 с периферийным

утолщением, прижимной фланец 5 и гайка 6. Наружные диаметры опорного фланца и мембраны предварительно обрабатываются совместно в собранном состоянии.

Поэтому при завинчивании гайки 6 они точно совпадают, обеспечивая жесткое закрепление круга 1. Эластичная прокладка 3 позволяет уменьшить передачу вибраций от шпинделя к отрезному кругу.

Применяемые в промышленности круги на основе синтетических алмазов изготавливаются методом порошковой металлургии с использованием прокатки. Их толщина составляет 36... 180 мкм, высота режущего лезвия 0,4 ...3 мм, стойкость— $14 \cdot 10^3$ операций. Круги,

армированные бронзовой сеткой имеют среднюю стойкость $22 \cdot 10^3$ операций на пластинах кремния диаметром 100 мм и толщиной до 0,5 мм.

Таблица 13.2 - Технические данные ряда установок резки алмазными кругами

Модель	Число оборотов шпинделя в минуту	Скорость рабочей подачи, мм/с	Скорость холостого хода, мм/с	Скорость подачи шпинделя, мм/с	Число режимов резания
ЭМ-215	45000	3...100	100	20	100
04ПП100	10 000... 90 000	2, 5...150	100	20	100
ЭМ-225	30 000... 60 000	1 ... 250	250	50	150

В современных установках резки алмазными кругами используются системы управления на базе микропроцессоров. Например, использование в установке ЭМ-225 микропроцессора К580ИК80 и микросхем серии К.589 позволяет гибко управлять приводами, программировать режимы резания, рассчитывать оптимальные варианты обхода контура круглых пластин различных диаметров, уменьшая холостые пробеги круга. Микропроцессор установки УРП-150 М, кроме того, обеспечивает автоматический вывод круга на рабочий режим, корректировку глубины резания по мере радиального износа алмазного круга.

Технические данные ряда установок резки алмазными кругами приведены в табл. 13.2.

13.2. Установки для монтажа кристаллов

Монтаж кристаллов и присоединение выводов к контактным площадкам сформированной на кристалле интегральной схемы является одной из заключительных операций их производства. Конечная цель этой операции — создание перемычек между контактными площадками кристалла и соответствующими выводами корпуса.

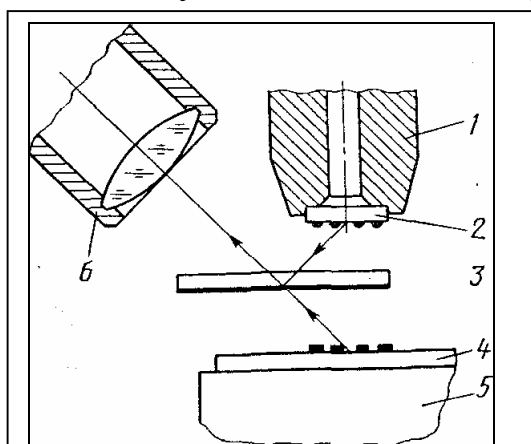


Рисунок 13.4 - Монтаж перевернутого кристалла на

Различают три типовых технологических процесса и три комплекта оборудования для выполнения этой операции.

Первый технологический процесс — посадка перевернутого кристалла — реализует групповой метод сборки и ориентирован в основном на сборку больших гибридных интегральных схем.

При этом на контактных площадках кристалла формируются выступающие над его поверхностью шариковые выводы, либо балочные, несколько выступающие за пределы его боковых граней. Кристалл монтируется на выводы основания в перевернутом виде при этом одновременно кристалл закрепляется и создаются переемычки между контактными площадками кристалла и основания.

Для соединения контактных площадок кристалла и основания наиболее часто используют термокомпрессионную либо ультразвуковую микросварку. При термокомпрессионной микросварке в зоне соединения создается давление 100 . . . 200 МПа и температура 573 ... 673 К (300 ... 400 °С). При ультразвуковой сварке в зону соединения подводятся сдвиговые ультразвуковые колебания с амплитудой 0,5 ... 2 мкм и частотой 20 60 кГц и поверхности сжимаются с удельным давлением 20 ... 120 МПа. Выделяющееся на границе стыка в результате сдвиговых колебаний тепло, разрушение окисных пленок и взаимное сжатие способствуют образованию на начальном этапе взаимодействия качественного соединения.

С наибольшими трудностями при монтаже перевернутых кристаллов сталкиваются при совмещении их контактных выступов с контактными площадками основания. Особенно это актуально для шариковых выводов, совершенно не выходящих за контуры кристалла.

Универсальной установкой для присоединения перевернутых кристаллов к внешним выводам методом ультразвуковой или термокомпрессионной сварки является установка ЭМ-431. Контроль за процессом соединения производится в микроскоп через оптическую систему с полупрозрачным зеркалом (рис. 2.4).

Инструмент 1 с вакуумной присоской на торце захватывает предварительно ориентированный кристалл 2 из подающей кассеты.

Оператор, наблюдая в микроскоп 6, вручную совмещает изображение контактных площадок основания 4 и шариковых выводов кристалла, перемещая рабочий столик 5 в двух взаимно перпендикулярных направлениях и по углу. После совмещения зеркало 3 убирается, инструмент опускается и кристалл монтируется на основание. Имеется возможность подогрева рабочего столика и инструмента, работает установка в полуавтоматическом цикле.

Технические характеристики установки ЭМ-431:

Производительность.....	до 400 крист./ч
Точность совмещения.....	±0,015 мм
Размеры рабочего поля манипулятора . . .	30x40 мм
Число кристаллов в кассете.....	до 200
Диапазон регулирования усилия сжатия . . .	1,6... 15 Н Диапазон
регулирования температуры:	
рабочего стола	373... 623 К (100...350
"С)	
инструмента	423...723 К (150...450 °С)
Частота ультразвукового генератора	59...61 кГц

Потребляемая мощность.....
Размеры.....
Масса.....

0,3 кВт
1200X660X1130 мм
140 кг

Применяется оборудование такого типа при монтаже отдельных кристаллов со сравнительно небольшим числом выводов при сборке гибридных ИС. Оборудование весьма производительное, а процесс монтажа отличается малой трудоемкостью.

Второй технологический процесс — монтаж кристаллов на ленточных носителях — также реализует групповой метод сборки. В нем, чтобы повысить точность совмещения, применяют ленточный носитель выводов толщиной 40 ... 60 мкм, позволяющий производить его непосредственное совмещение и соединение с контактными выводами кристалла. В качестве носителя используется алюминиевая, реже медная, фольга со сформированной на ней выводной рамкой, или фольга на прозрачной органической пленке, что повышает жесткость носителя и позволяет формировать на нем развитые выводные рамки. Полуфабрикатом для формирования таких ленточных носителей служит фольга с подслоем органической пленки, в нужных местах участки фольги либо участки пленки удаляют, последовательно проводя ряд фотолитографических операций и операций травления.

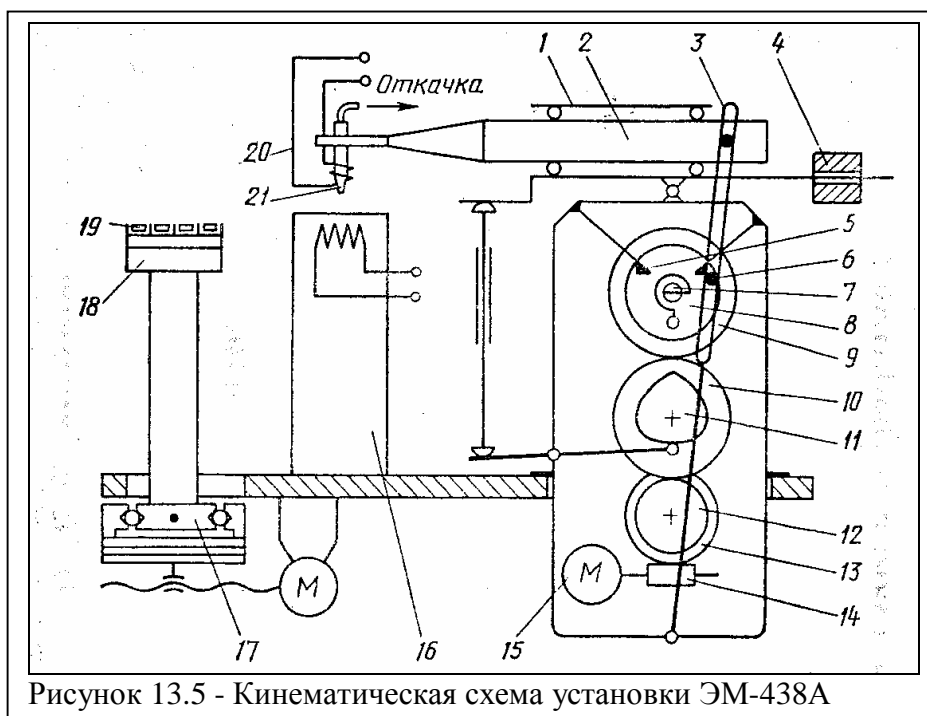


Рисунок 13.5 - Кинематическая схема установки ЭМ-438А

Для сборки ИС широкого применения выпущен комплект оборудования, реализующего метод монтажа кристаллов на ленточных носителях. На установке ЭМ-434 производится групповое присоединение контактных площадок кристалла к кадру

ленточного носителя методом ультразвуковой сварки. Носитель поставляется в рулонах и при присоединении сматывается с катушки. Затем кристалл защищают компаундом, отделяют и на установке ЭМ-435 наружные выводы ленточного носителя, оставшиеся на кристалле, приваривают групповым методом к выводной контактной рамке. Производительность этого комплекта оборудования составляет 400 ... 500 ИС в час.

Для приварки выводов ответственных ИС и БИС обычно используют третий метод сборки — метод индивидуальной раз-варки выводов кристаллов, включающий монтаж кристаллов в корпус или на выводную рамку и последовательный монтаж соединений между контактными площадками кристалла и контактными площадками выводов корпуса или рамки. Несмотря на меньшую по сравнению с групповым методом производительность, этот метод обеспечивает лучшее качество соединения благодаря стабильности давления в каждой зоне сварки, меньшему термическому и механическому воздействию на кристалл, возможности индивидуального контроля качества сварки каждой перемычки. Типовой комплект оборудования для реализации метода сборки индивидуальной сваркой выводов включает установки для монтажа кристалла в корпус ИС или на выводную рамку, для микросварки' выводов и установки герметизации БИС и ИС. При этом дискретные корпуса или отрезки ленты с 10—12 объединенными выводными рамками либо индивидуально подаются из специальных вертикальных кассет, либо объединяются ленточным носителем из специальной пластмассы в длинные ленты и подаются из бобин, что резко повышает вместимость загрузочно-разгрузочных накопителей, упрощает механизмы загрузки и транспортирования.

Для монтажа кристалла в корпусе или на выводной рамке используются установки ЭМ-438А, ОЗПВ-1 и ЭМ-4085. Корпуса или выводные рамки могут подаваться из кассет либо из бобин, для чего установки комплектуются сменными устройствами по-. дачи и транспортирования корпусов. Кристалл присоединяется клеем ВК 32-200 или с помощью эвтектической пайки, иногда с ультразвуковым воздействием.

Установка монтажа кристаллов ЭМ-438А предназначена для монтажа кристаллов методом эвтектической пайки с ультразвуковым воздействием и является одной из первых установок этого типа, реализующих автоматический цикл работы. Принципиальная схема установки изображена на рис. 13.5. Рабочий столик 16 оснащен устройством подогрева и системой подачи дискретных корпусов или отрезков лент с выводными рамками из .кассет или системой протягивания сплошной ленты-носителя с выводными рамками. Столик 18 с установленной на нем кассетой с кристаллами 19 перемещается координатным приводом 17 так, что под инструментом 21, закрепленным в ультразвуковой головке, в начале каждого цикла обработки останавливается очередная ячейка кассеты с кристаллом. Инструмент опускается, включается вакуумная присоска, захватывает кристалл, затем инструмент перемещается в рабочую зону над столиком 16. Здесь кристалл опускается в корпус или на выводную рамку, установленные на столике и предварительно разогретые до температуры 523 723 К (250 ... 450°C). Подачей тока в спираль 20 инструмент 21 также нагревается до 393 ... 573 К (120 ... 300°C), включается ультразвуковой генератор и производится процесс пайки.

Вертикальные движения инструмент получает от электродвигателя 15, совершающего реверсивное вращение на один оборот в одну и другую стороны. При этом вращение передается через червяк 14 и червячное колесо 13, пару шестерен 12 и 10 на кулачок 11, толкатель которого поднимает и опускает сварочную головку. Горизонтальные перемещения ультразвуковая головка 2 получает от кривошипа 9, входящего с помощью ролика 6 в паз водила 3 кулисного механизма. Перемещается ультразвуковая головка в шариковых направляющих корпуса 1.

Для регулировки величины и места хода предусмотрены два упора 5, ограничивающие угол поворота водила. При наезде водила на упор оно останавливается, но весь привод продолжает работать, проводя дальнейшее опускание инструмента. При этом вращаться валу позволяет пружина 7, связывающая диск 8, на котором укреплено водило с валом. Усилие прижима инструмента регулируется грузом 4.

На валах привода установлен ряд бесконтактных выключателей, управляющих автоматическим циклом работы и производящих в необходимые моменты времени включение и выключение привода перевода кассеты, включение спирали импульсного нагрева инструмента, реверсивное переключение двигателя 14, обдув кристалла на рабочем столике, вакуумирование вакуумной присоски инструмента.

Техническая характеристика установки ЭМ-438А:

Производительность.....	1000 крист./ч
Размеры монтируемых кристаллов	до 1,8X1,8 мм
Температура на рабочем столике....	.523 ... 723 К (250 ...450 °С)
Температура нагрева инструмента	393...573 К (120.300 °С)
Потребляемая мощность.....	0,6 кВт
Габаритные размеры.....	1020X660X1277 мм
Масса.....	155 кг

Установки ОЗПВ 2000-1 и ЭМ-4085 представляют новое поколение оборудования для монтажа кристаллов, создание которого стало возможным благодаря применению микропроцессорных систем управления и систем искусственного зрения, реализуемых на новейшей элементной базе (микроЭВМ и приборах с зарядовой связью). В установках нового поколения широко применяются новые электромеханические преобразователи электрической энергии в механическое перемещение рабочих органов— шаговые и линейные шаговые двигатели, позволяющие реализовать все преимущества микропроцессорных систем управления. Для примера сравните привод ультразвуковой сварочной головки установки ЭМ-438А и описанной далее установки микросварки выводов с управлением от микроЭВМ. Хотя в последней установке сварочная головка осуществляет гораздо более сложный цикл работы, конструктивно она выглядит проще. Нет большого числа управляющих бесконтактных лепестков, кулачков, упоров и пружинных демпферов, а точность и плавность гораздо выше — и все это результат применения шагового двигателя и управляющей микроЭВМ.

Характерной особенностью нового поколения оборудования для монтажа кристаллов помимо стремления к полной автоматизации является и стремление к универсальности, что повышает гибкость производственной системы, где используются подобные установки. Так, эти установки могут реализовать методы эвтектической пайки или приклейки кристалла, брать кристалл из кассеты или с адгезионного носителя, производить загрузку дискретных корпусов и отрезков лент с выводными рамками.

Установка ОЗПВ 2000-1 работает в автоматическом цикле и обеспечивает подачу, перемещение и фиксацию индивидуальных оснований корпусов БИС или корпусов в ленте, выборку кристаллов из кассеты и их ориентацию, подачу клея в зону монтажа (при монтаже на клей), монтаж кристаллов в корпус, нагрев основания (при монтаже эвтектической пайкой).

Управление автоматическим циклом осуществляет микроЭВМ «Электроника 60М».

Технические характеристики установки ОЗПВ 2000-1:

Производительность.....	1600 крист./ч
Наибольший размер монтируемых кристаллов	10X10 мм
Усилие сжатия соединяемых элементов . . .	0,25... 6,0 Н
Потребляемая мощность.....	1,2 кВт
Габаритные размеры.....	1800X930X1600 мм
Масса.....	350 кг

Благодаря автоматизации рабочего цикла в обязанности оператора входит лишь перезагрузка кассет с кристаллами и бобин с корпусами и периодический контроль за работой. Один оператор обслуживает четыре установки.

Автомат присоединения кристаллов ЭМ-4085 предназначен для присоединения кристаллов к корпусам ИС методом эвтектической пайки или с помощью клея. Подача приборов, поиск годного кристалла на пластине и его присоединение производятся автоматически. Автомат оснащен системой искусственного зрения, распознающей годные кристаллы по отсутствию маркировочных пятен, трещин и сколов. Мониторы позволяют контролировать процесс опознавания годных и бракованных кристаллов и процесс посадки кристаллов в корпус.

Кристаллы могут подаваться из кассеты либо с адгезионного носителя. В последнем случае пластина перед скрайбированием наклеивается на органическую пленку — адгезионный носитель и после скрайбирования ломается на кристаллы, которые остаются на носителе. При подаче в установку адгезионный носитель растягивается в рамке, кристаллы несколько расходятся и поочередно снимаются с носителя вакуумным захватом на инструменте и толкателем, действующим на кристалл снизу так, что носитель прогибается и отделяется от кристалла. Линейный шаговый двигатель перемещения рамки с адгезионным носителем обеспечивает быстрое действие и надежность автомата.

Многомагазинный механизм подачи оснований корпусов обеспечивает их точную фиксацию на рабочей позиции. При этом автомат может комплектоваться системой питания дискретными корпусами либо отрезками лент с выводными рамками, либо системой питания корпусами на ленточном носителе из бобин. Двухкоординатный стол для перемещения сварочной головки позволяет осуществлять многокристальную сборку и программировать вибрацию инструмента.

Управление автоматом осуществляет микропроцессорный контроллер, имеющий режим обучения и автоматический режим работы.

Технические характеристики автомата ЭМ-4085:

Производительность	3600 крист./ч
Диаметр обрабатываемых пластин	до 125 мм
Размеры присоединяемых кристаллов:	
при использовании адгезионного носителя	1X1 .. .4X4 мм
при использовании кассет	до 10X10 мм
Максимальное число присоединенных кристаллов при многокристальной сборке	до 99
Погрешность присоединения:	
по координатам X и Y	±0,05 мм
по углу.....	±5°
Температура нагрева рабочего стола	523 ... 473 К (250
.450 °С)	
Потребляемая мощность	1,6 кВт
Габаритные размеры .	300X940X1870 мм
Масса.....	450 кг

13.3 Установки для присоединения выводов

Микросварку выводов осуществляют обычно методом термокомпрессии либо ультразвуковой сваркой. Проволока для образования перемычек между контактными площадками кристалла и выводов корпуса подается через центральное или боковое капиллярное отверстие сварочного инструмента. Инструмент с центральной подачей проволоки обычно используют при термокомпрессионной сварке, требующей для образования качественных соединений в 2—4 раза больших усилий сжатия, чем при ультразвуковой сварке.

При термокомпрессионной сварке на первом этапе (рис. 13.6,а) на конце проволоочки 1 образуется шарик электрическим разрядом или путем оплавления ее конца в пламени водородной горелки 4. Затем инструмент 3 опускается к месту сварки, к нему прикладывается необходимое усилие сжатия. Рабочий столик с установленным на нем изделием предварительно разогревается до температуры 473 .. . 673 К (200 ... 400 °С), при необходимости производится импульсный нагрев инструмента и в месте контактирования металлизированной площадки кристалла и вывода образуется качественное соединение (рис. 2.6,б). Затем инструмент поднимается, при этом щипцы 2 разжимаются и проволочка протягивается через капилляр. Рабочий столик перемещается, подводя под инструмент

вторую контактную площадку, инструмент опускается, и второе соединение формируется -внахлест (рис. 13.6,в). Щипцы зажимаются и, перемещаясь от инструмента, проводят обрыв проволоочки. Инструмент поднимается, щипцы производят подачу очередного участка проволоки, и цикл сварки повторяется.

При ультразвуковой сварке формируется нахлесточное соединение, при этом используют инструмент с боковой подачей проволоки. Процесс соединения состоит из тех же этапов, что и ранее рассмотренный, за исключением образования шарика на конце проволоки.

В последние 15 лет для монтажа проволочных перемычек разработано три поколения оборудования, реализующего метод термокомпрессионной и ультразвуковой сварки, причем оборудование первого поколения полностью вытеснено более совершенным оборудованием второго и третьего поколений.

В машинах первого поколения совмещение контактных площадок с инструментом осуществлялось вручную, процесс сварки производился автоматически. Неточная посадка кристалла в корпус и погрешности базирования корпуса на рабочем столике не позволяли автоматизировать процесс перевода контактных площадок под инструментом.

Оборудование второго поколения было оснащено микропроцессорными системами управления на базе микроЭВМ «Электроника 60М». Оператор в режиме обучения проводил сварку

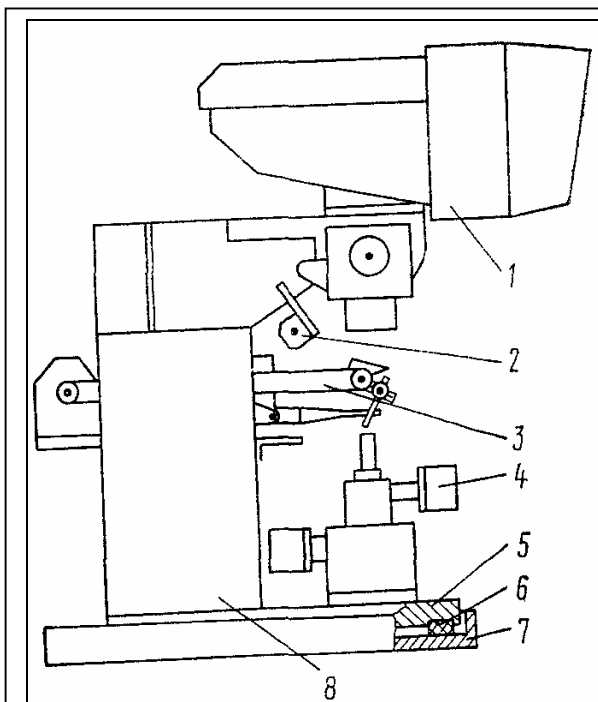


Рисунок 13.7 - Блок микросварки ультразвуковых установок монтажа перемычек

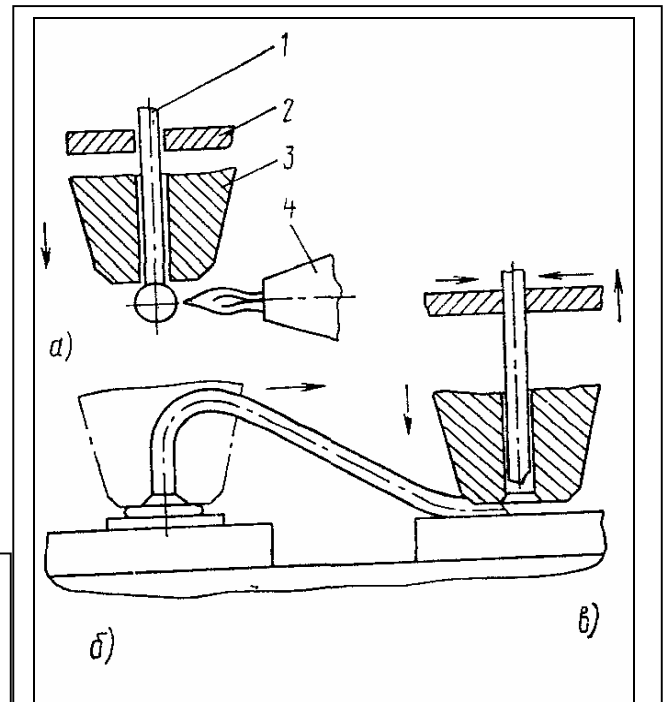


Рисунок 13.6 - Последовательность монтажа проволочных перемычек

эталонной ИС, при этом в память ЭВМ вводились эталонные координаты контактных площадок, двух реперных точек на кристалле и двух на корпусе. При использовании корпусов с точными базирующими отверстиями или выводных рамок достаточно вводить только реперные точки на кристалле. В автома-

тическом режиме оператор совмещал световую указку (перекрестье проектора или микроскопа) с центрами реперных точек кристалла и корпуса или только кристалла. При отклонении реперных точек от эталонного положения микроЭВМ корректировала положение столика по двум координатам к углу так, чтобы отклонение реперных точек было минимально, и управляла процессом сварки. Возможен и другой вариант коррекции, когда корректируется не положение столика, а программа обработки с переводом ее из эталонной зоны памяти в рабочую, что производится быстрее с использованием современных быстродействующих микропроцессорных средств управления. Помимо этого в последних образцах оборудования второго поколения были применены более совершенные и плавные приводы сварочных головок, позволившие увеличить быстродействие до 10000 ... 14000 присоединений в час при реализации сварки обоими методами. Типичными представителями оборудования второго поколения для термокомпрессионной микросварки выводов являются установки ЭМ-490, для ультразвуковой микросварки— ОЗУН-7100 и ОЗУН-10000, обеспечивающие 7100 ... 12500 присоединений в час и компенсацию отклонений положения кристалла в корпусе до $\pm 0,5$ мм по координатам и $\pm 7^\circ$ по углу.

В оборудовании третьего поколения — адаптивных микросварочных роботах — была применена система искусственного зрения, полностью автоматизирующая процесс коррекции положения кристалла за счет автоматического сканирования его поверхности и определения координат центров реперных точек. Представителями таких установок являются ОЗУН-12000 МЗ, ЭМ-4020Б для ультразвуковой и ЭМ-4060 для термокомпрессионной сварки выводов. Производительность этого оборудования составляет соответственно 12000, 14000 и 28000 сварок в час. Уникальная производительность установки ЭМ-4060 была достигнута применением развернутого, 3-координатного шагового привода сварочной головки и электрического разряда для формирования шарика на перемычке. Здесь рассмотрим работу основных узлов второго и третьего поколений этих машин на примере установки ультразвуковой микросварки. Основу установки ультразвуковой микросварки выводов составляет блок микросварки (рис.13.7), предназначенный для закрепления ИС на рабочем столике и формирования на них проволочных выводов.

Основанием блока является плита 7, на которой на амортизаторах 6, гасящих вибрацию, закреплена плита 5 с координатным столом 4 и корпусом 8. В корпусе установлены механизмы микросварки 3 и пневмоклапана привода, обеспечивающего закрепление и снятие ИС.

Механизм микросварки осуществляет процесс сварки, подачу алюминиевой проволоки из катушки 2 и ее обрыв, вертикальные перемещения инструмента для прижима его к контактным площадкам кристалла и корпуса и для образования проволочных перемычек заданной высоты.

Координатный столик служит для коррекции положений кристалла и корпуса ИС по осям X, Y и углу разворота φ и для перемещения ИС в процессе сварки выводов. При этом коррекция может осуществляться по двум реперным точкам на кристалле и двум реперным точкам на корпусе ИС. При наличии базирующих отверстий на корпусе достаточно коррекцию проводить только по двум реперным точкам кристалла.

При ручной коррекции оператор вручную подводит соответствующие точки под перекрестье проектора 1 и фиксирует эти позиции столика в памяти ЭВМ. Машина находит смещение соответствующих реперных точек от эталонных, введенных в режиме обучения, рассчитывает необходимые перемещения по осям X, Y и φ для наиболее полной компенсации этих смещений и, управляя столиком, производит отработку перемещений по осям и разворот. При автоматической коррекции система искусственного зрения

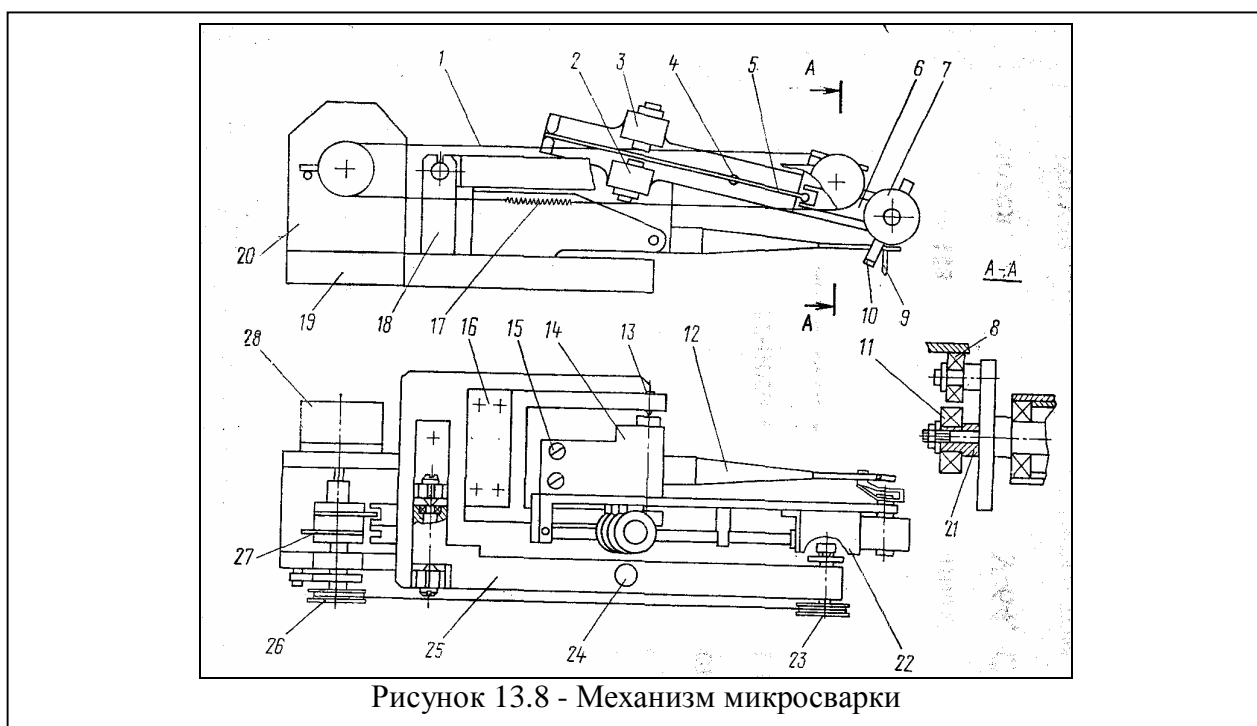


Рисунок 13.8 - Механизм микросварки

определяет границы и координаты центра каждой реперной точки, по этим координатам рассчитывает необходимые смещения по осям и по углу и проводит коррекцию.

Механизм микросварки изображен на рис.13.8. На основании 19 закреплены кронштейны 16, 18 и 20, на которых смонтированы основные узлы механизма: сварочная головка 14, рычаг механизма подъема 25 и привод механизма подъема.

Привод механизма подъема включает шаговый двигатель 28, приводящий во вращение вал механизма подъема, на котором закреплены лепестки 27, фиксирующие верхнее (холостое) и нижнее (рабочее) положения сварочной головки. На валу механизма подъема закреплен шкив 26, связанный стальным тросиком 1 со шкивом 23, закрепленным на рычаге механизма подъема. Тросик прикреплен к обоим шкивам и делает по их поверхности по полтора витка. Свободные концы тросика стягиваются

пружиной 17, таким образом между шкивами образуется кинематически точная связь, позволяющая им совершать один оборот. На фланце вала шкива 23 на втулках 21 закреплены подшипники 8 и 11, взаимодействующие с башмаком 22, прикрепленным к основанию сварочной головки. При этом сварочная головка поворачивается в опорах 13.

Подшипник 8 определяет верхнее исходное положение сварочной головки. При дальнейшем вращении вала с башмаком начинает контактировать подшипник 11, эксцентрично закрепленный на валу и определяющий вертикальные перемещения сварочной головки в процессе приварки проволоки к контактным площадкам кристалла, к выводам корпуса и при образовании петли проволоочной перемычки. Управление вращением шагового двигателя и вертикальным перемещением головки осуществляет управляющая микроЭВМ «Электроника 60М». Необходимые положения сварочной головки вводятся в память ЭВМ в процессе обучения. Положения головки при приварке контактов кристалла и выводов корпуса фиксируются по наличию электрического контакта между сварочной головкой и корпусом. При этом ЭВМ запоминает состояние (число шагов) шагового двигателя. Положение головки при образовании петли программируется при обучении. При этом перемещением головки управляют вручную, пока не получат перемычку требуемой высоты. При переходе на автоматический режим это положение головки будет зафиксировано в памяти машины.

Вертикальные перемещения головки производятся относительно рычага 25 механизма подъема, его положение регулируется винтом 24. Ультразвуковой преобразователь 12 с инструментом 9 упруго закреплен в корпусе 14, усилие прижима регулируется винтом 15.

На кронштейне сварочной головки размещены сварочные щипцы 10, осуществляющие зажим, подачу и обрыв проволоки. Зажим проволоки производится смыканием губок щипцов электромагнитом 7. Подача и обрыв проволоки осуществляется за счет поворота щипцов в зажатом состоянии в вертикальной плоскости. Для их поворота служит пластина 5, закрепленная в шарнирной опоре 4. Один конец пластины защемлен, а второй входит в паз рычага 6, связанного с щипцами. При подаче тока в катушку электромагнита обрыва проволоки 2 центр пластины опускается вниз, а ее конец поворачивает рычаг 6 по часовой стрелке, отводя щипцы от инструмента и обрывая алюминиевую проволоку. Для подачи проволоки запитывается электромагнит 3, при этом щипцы перемещаются к инструменту и проталкивают

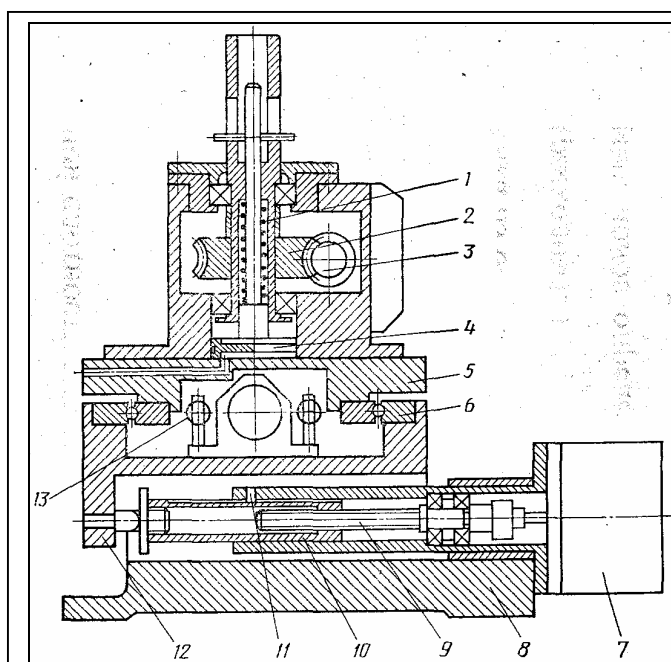


Рисунок 13.9 - Координатный стол

рычага 6, связанного с щипцами. При подаче тока в катушку электромагнита обрыва проволоки 2 центр пластины опускается вниз, а ее конец поворачивает рычаг 6 по часовой стрелке, отводя щипцы от инструмента и обрывая алюминиевую проволоку. Для подачи проволоки запитывается электромагнит 3, при этом щипцы перемещаются к инструменту и проталкивают

проволоку. Величина хода щипцов при подаче и обрыве проволоки и усилие их смыкания регулируется положением сердечников соответствующих электромагнитов.

Координатный стол для угловых и линейных перемещений представлен на рис. 2.9. На плите 8 смонтирован привод для перемещения по одной из координат, включающий шаговый электродвигатель 7, передающий вращение на ходовой винт 9, который поступательно перемещает гайку 10, фиксируемую от поворота скользящей шпонкой 11. Торец гайки упирается в каретку 12, перемещающуюся в шариковых направляющих и прижимаемую к гайке двумя пружинами аналогично каретке 5

В каретке 12 смонтирован такой же привод для перемещения по другой координате в шариковых направляющих 6 каретки 5. Пружины 13 прижимают каретку к торцу ведущей гайки.

На поверхности каретки 5 смонтирован привод поворота рабочего столика и механизм закрепления или освобождения корпуса обрабатываемой ИС. Вращение от шагового электродвигателя 5 через червяк 3 передается на колесо 2, приводящее во вращение рабочий столик. Для фиксации корпуса служит поршень 4, который при подаче воздуха перемещается вверх, сжимая пружину 1 и перемещая вверх штифт, осуществляющий подъем фиксатора. Корпус удерживается усилием пружины при опускании фиксатора.

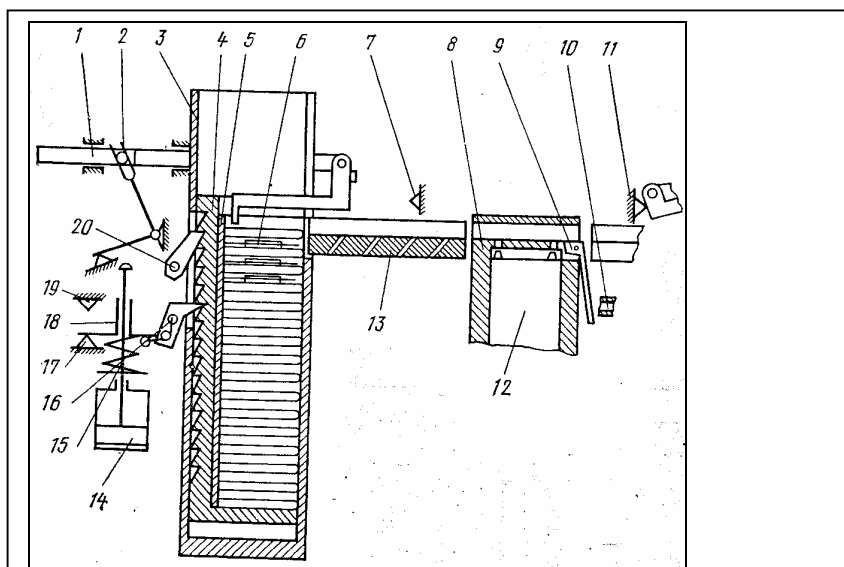


Рисунок 13.10- Механизм загрузки-выгрузки корпусов ИС

Устройство загрузки-выгрузки (рис. 13.10) предназначено для автоматической подачи дискретных корпусов ИС 6 из подающей кассеты 5 на рабочий столик 12 и передачу их после обработки с рабочего столика в приемную кассету. Устройство симметрично относительно столика, и на рисунке показана только левая подающая часть.

Состоит оно из двух сходных механизмов подачи кассет снизу вверх, подающего 13 и приемного пневмолотка. Для вертикального перемещения кассеты установлены челноки 4, перемещающиеся в корпусе 3 и снабженные храповыми рейками. В зацепление с рейками входят две собачки — подающая 16 и стопорная 20. Выше расположен грейфер 1, перемещающийся в горизонтальном направлении при повороте рычага 2. На рабочем столике закреплен стопор 9, лепесток которого может обдуваться воздухом через сопло 10.

Работает устройство следующим образом. Нажатием специальной кнопки стопорная и подающая собачки отводятся, и челноки приемной и подающей кассет вместе с кассетами переводятся в нижнее положение. После этого поршень пневмоцилиндра отводится вниз, грейфер входит в кассету. Это исходное положение механизма и показано на рис. 9.10. Для осуществления цикла загрузки-выгрузки воздух подается сначала в нижнюю, затем в верхнюю полость пневмоцилиндра 14 в устройстве загрузки столика и в нижнюю, затем в нижнюю в устройстве выгрузки.

При движении поршня вверх пружина 15 перемещает втулку 18, находящуюся на штоке, от упора 17. Собачка 16, связанная с втулкой, сдвигает храповую рейку на один шаг, кассета поднимается и очередная ИС подается под захват грейфера 1. При дальнейшем движении штока вертикальное перемещение собачки ограничивается упором 19 и кассета дальше не перемещается. Торце шток доходит до рычага 2 горизонтального перемещения грейфера, поворачивает его и сдвигает грейфер вправо до упора 7, при этом захват грейфера выталкивает корпус ИС из подающей кассеты на пневмолоток. По пневмо-лотку ИС перемещается на рабочий столик 12 и доходит до упора 9, на лепесток которого воздействует воздушная струя из сопла 10. Фиксатор 8 опускается, фиксирует и ориентирует поданную ИС по базирующим отверстиям в выводной рамке. Одновременно шток пневмоцилиндра 14 перемещается вниз, захват грейфера входит в кассету, неподвижная собачка 20 фиксирует челнок, а подвижная 16 захватывает очередной зуб храповой рейки. На этом цикл погрузки заканчивается.

Цикл выгрузки идет одновременно с загрузкой, но при выгрузке в исходном положении поршень пневмоцилиндра находится вверху, а грейфер выдвинут из кассеты и упирается в упор 11, поднимающий захват и освобождающий трек пневмолотка, на который ИС сдувается со столика. При перемещении поршня вниз правый грейфер, который несколько короче левого загрузочного, досылает ИС в приемную кассету, кассета перемещается вверх на шаг, грейфер сдвигается влево и цикл завершается.

Подобными устройствами для загрузки дискретных корпусов из вертикальных кассет оборудован целый ряд установок, оперирующих с полуфабрикатами подобного рода: установки монтажа кристаллов, классификационные устройства и др. Близки по принципу действия и конструктивным решениям и устройства загрузки-выгрузки отрезков перемещения кассет и горизонтального перемещения отрезков ленты.

Оборудование для герметизации

Герметизация бывает корпусная и бескорпусная. Корпуса считаются герметичными при натекании гелия менее $1,32 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$. Герметизация корпусов осуществляется сваркой, пайкой, склеиванием, завальцовкой, заваркой стеклом.

Сварка бывает холодной, контактной и сваркой плавлением (аргонно-дуговая, микроплазменная, электронно-лучевая, лазерная).

Холодная сварка применяется для металлов корпусов и крышек Al, Cu, кобальта. Относительная деформация при сварке составляет 60-80%, давление - $0,17-2,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$.

Контактная (электроконтактная сварка) включает в себя сварку по контуру и шовную (роликовую).

Контактной сваркой называется процесс получения разъемного соединения материалов путем нагрева для до пластического или расплавленного состояния с последующим сжатием (осадкой).

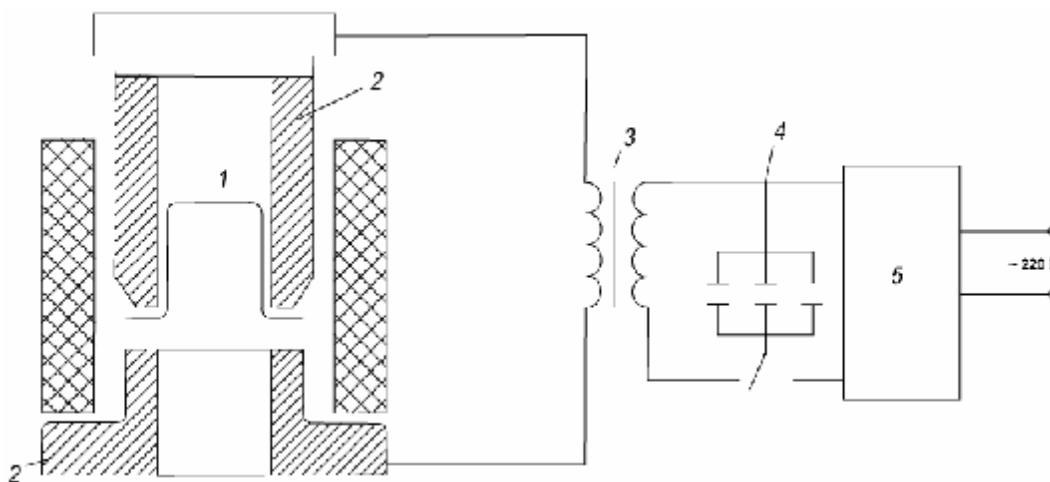


Рисунок 14.1 – Схема контактной сварки

1- корпус; 2-электроды; 3-сварочный трансформатор; 4-батарея конденсаторов; 5-выпрямитель

Ток во вторичной цепи зависит от емкости батареи конденсаторов ($C=800-1200 \text{ мкФ}$ на 1 мм периметра), от коэффициента полезного действия ($\text{кпд} = 0,65$) и от напряжения во вторичной обмотке трансформатора. Давление на свариваемый контур составляет $12-18 \text{ кгс}/\text{мм}^2$

Электроды бывают комбинированные и некомбинированные. Основание комбинированного электрода выполняют из меди марок М1, М2, а рабочую часть наконечника из сплава эльконит ВМ (20-30%Cu,70-80%W).

Наконечник припаивается серебряным припоем. Некомбинированные электроды изготавливаются из бронзы БрБ2, сплавов на основе Cu, Be, Ti.

Схема роликовой сварки представлена на рис.14.2

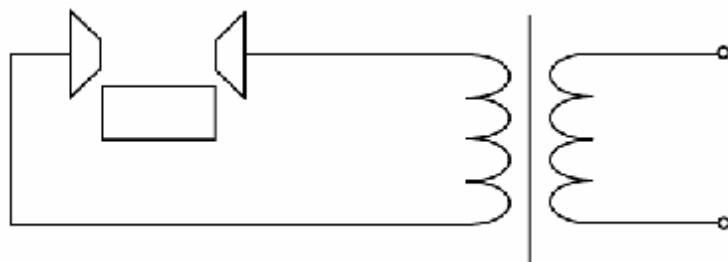


Рисунок 14.2 –Схема роликовой сварки

Сварка плавлением заключается в формировании сварного шва за счет высокой температуры в зоне герметизации. На рис.14.3 представлен вид сварного шва и схема аргонно-дуговой сварки.

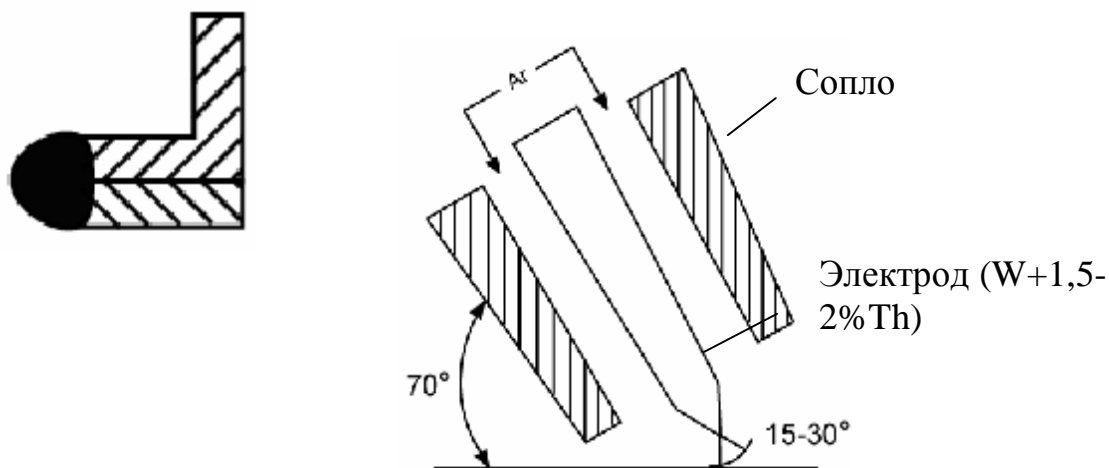


Рисунок 14.3 – Схема аргонно-дуговой сварки и вид сварного шва

Размер дуги составляет обычно 0.6-0.7 мм, скорость сварки достигает 10- 55 см/мин.

На рис. 14.4 изображена другая разновидность аргонно-дуговой сварки для герметизации корпусов микросхем, в которой для предотвращения окисления сварного шва применяется обдув последнего струей защитного газа (обычно аргон), а также наличие теплоотвода.

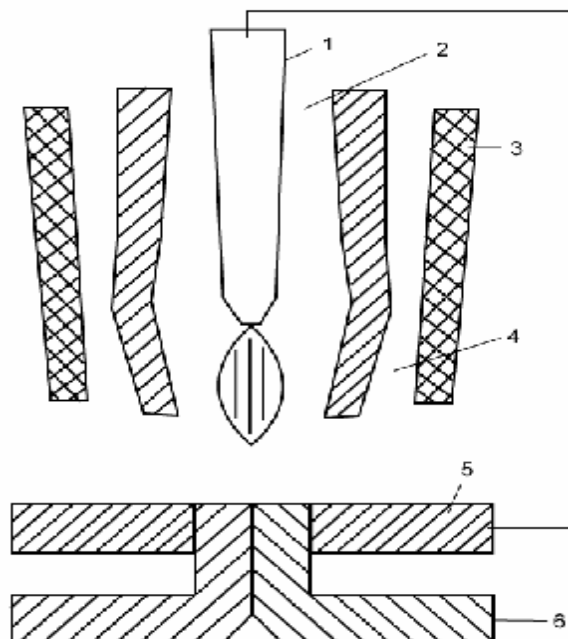


Рисунок 14.4 – Схема аргонно-дуговой сварки с защитой сварного шва от окисления

1 – электрод; 2 – плазмообразующий газ; 3 – корпус; 4 – защитный газ; 5 – теплоотвод; 6 – герметизируемый корпус

Герметизация электронно-лучевой сваркой обладает следующими преимуществами:

- точное управление и регулирование тепловой энергии;
- локальный нагрев;
- высокая чистота процесса (вакуум).

Установка электронно-лучевой сварки (рис.14.5) включает катодный узел 4, фокусирующую линзу 6, анод 5 с отверстием. Расстояние между анодом и катодом составляет 10-15 см. На катод подается отрицательный потенциал 20-200 кВ.

Сварные швы, полученные данным способом, имеют мелкочешуйчатую поверхность по всей длине, дефектом швов могут быть непровары, смещения линии стыка кромок относительно оси.

Герметизацию электронно-лучевой сваркой можно осуществлять в непрерывном и импульсном режимах, но предпочтительнее в импульсном, т.к. возможна герметизация с малой зоной термического влияния.

Основными параметрами процесса являются ускоряющее напряжение, диаметр электронного луча, скорость сварки, длительность и частота следования импульсов. Суммарная толщина отбортовки корпуса под сварку должна быть 0,4-0,8 мм, глубина проплавления – 0,5-0,8 мм, степень перекрытия сварных точек – 50-60% от из диаметра.

Главный недостаток установки – сложность конструкции.

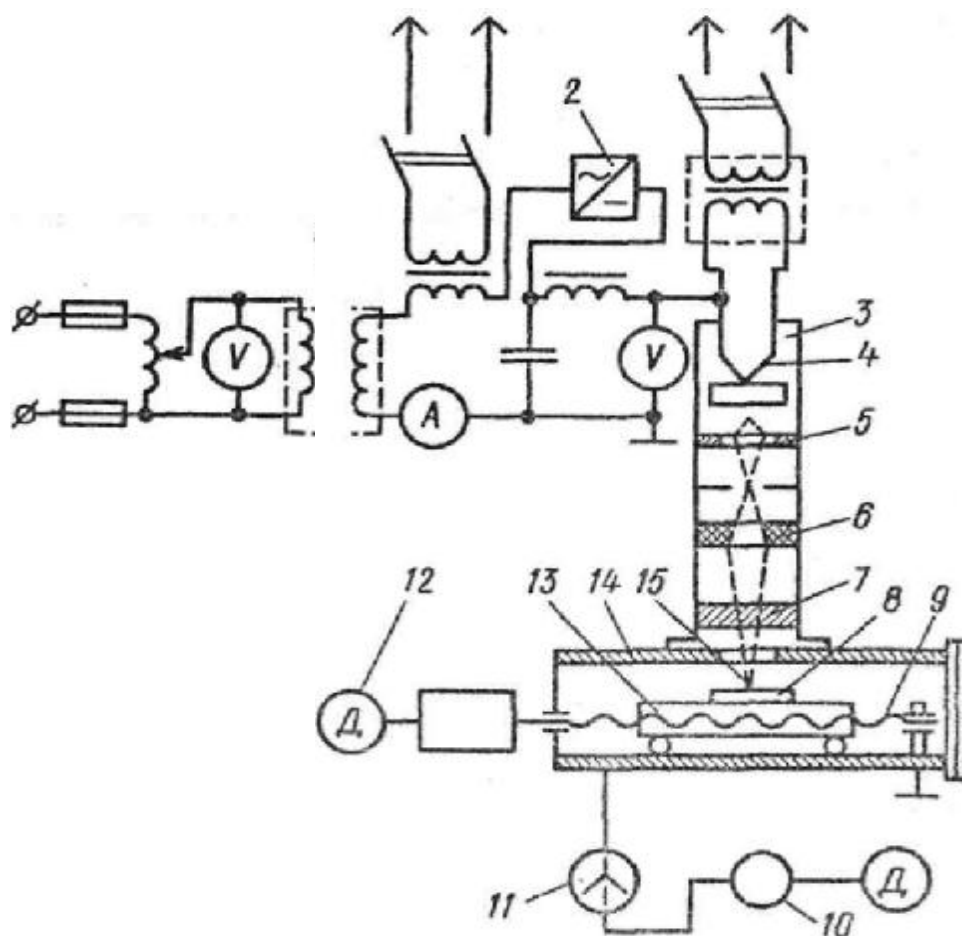


Рисунок 14.5 – Устройство установки электронно-лучевой герметизации

1 – высоковольтный трансформатор; 2 – выпрямитель; 3 – электронная пушка; 4 – катод; 5 – анод; 6 – электромагнитная фокусирующая линза; 7 – отклоняющая система; 8 – корпус полупроводникового прибора; 9 – ходовой винт; 10, 11 – форвакуумный и диффузионный насосы; 12 – электродвигатель привода столика; 13 – столик; 14 – рабочая камера; 15 – электронный пучок

Устройство для герметизации лазерной сваркой имеет перед электронно-лучевой сваркой следующие преимущества:

- возможность концентрации сравнительно больших энергий на малых площадях, т.е. высокая локальность процесса;
- легкость фокусирования обычной оптикой;
- отсутствие специальных сред (вакуум);
- возможность соединения разнородных, разнотолщинных, тугоплавких и материалов, обладающих высокой теплопроводностью
- слабый нагрев близко расположенных от места сварки участков
- отсутствие деформации деталей корпуса.

Недостатками лазерной герметизации является потеря энергии при сварке металлов, обладающих высоким коэффициентом отражения, например, для никеля $K_{отр.} = 0,68$ при $\lambda=0,7$ мкм). Для уменьшения отражения применяют увеличение шероховатости поверхности, покрытие свариваемых металлов пленками с низким коэффициентом отражения, а также использованием т.н. "светоловушек", в качестве которых могут использоваться треугольные щели.

Схема специализированной полуавтоматической двулучевой установки Квант-17 показана на рис.14.6. Она предназначена для герметизации одновременной сваркой с двух сторон корпусов микросхем размерами от 10 до 40 мм. Для этого в установке имеются два активных элемента б, которые расположены соосно и помещены в отдельные камеры с импульсными лампами накачки 7, подключенными к общему источнику питания 8 последовательно для обеспечения одинаковых излучений, и резонатор, состоящий из двух сферических зеркал 5. С помощью призм / полного внутреннего сражения и объективов 2 лазерные лучи с двух сторон направляются на сварочные кромки корпуса 4 микросхемы и фокусируются на них.

Для укладки герметизируемых микросхем служит многоместная кассета 3, которая после сварки двух параллельных сторон корпуса автоматически перемещается с заданной скоростью и поворачивается на 90° для герметизации двух других сторон.

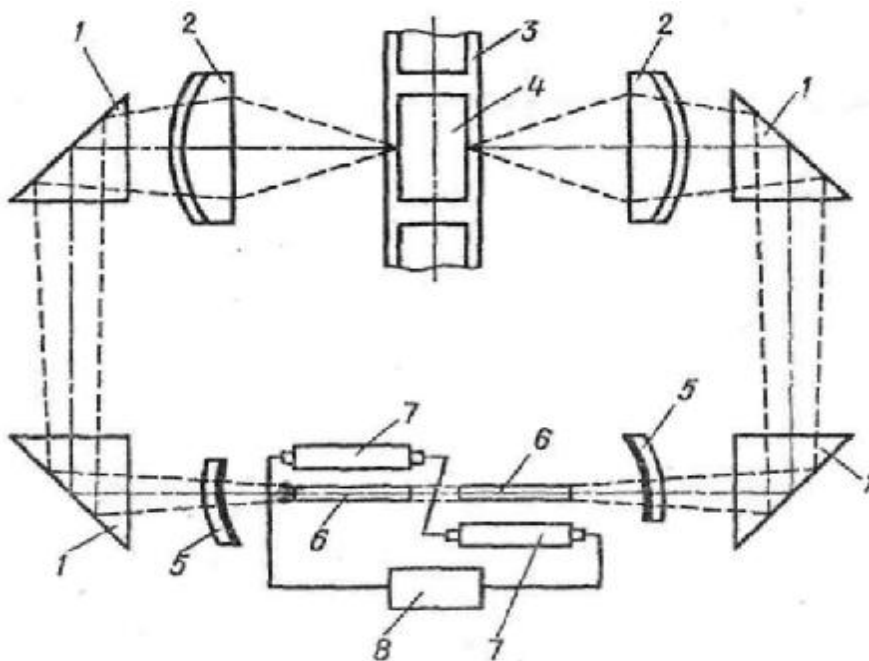


Рисунок 14.6 – Схема полуавтоматической двулучевой установки Квант-

1-призма полного отражения; 2-объектив; 3 - кассета; 4-корпус микросхемы, 5-сферическое зеркало; 6-активный элемент, 7-лампа накачки; 8-источник питания.

Герметизация пайкой осуществляется в конвейерных печах и струей горячего газа на специальных установках. Преимущество такой герметизации заключается в отсутствии значительных давлений и специального инструмента, а недостатком является нагрев до температуры 200-350⁰С, наличие флюса, необходимость работы в атмосфере водорода или инертного газа, критичность режимов сварки. Используются закладные детали из припоя, кассеты изготавливаются из графита и нержавеющей стали.

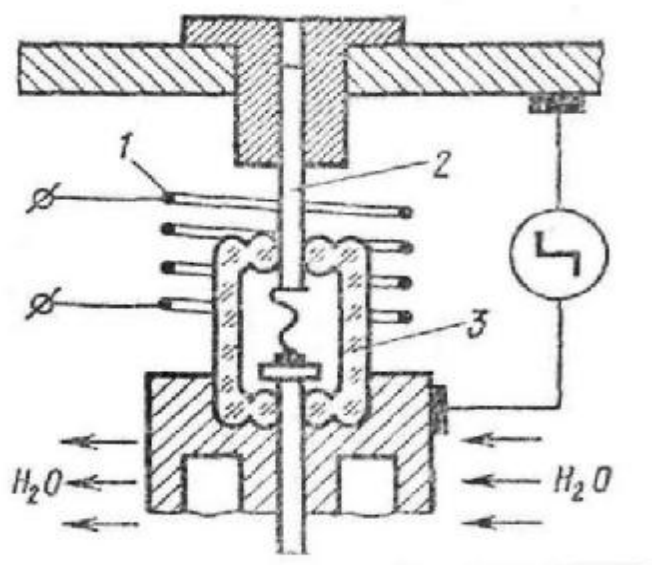
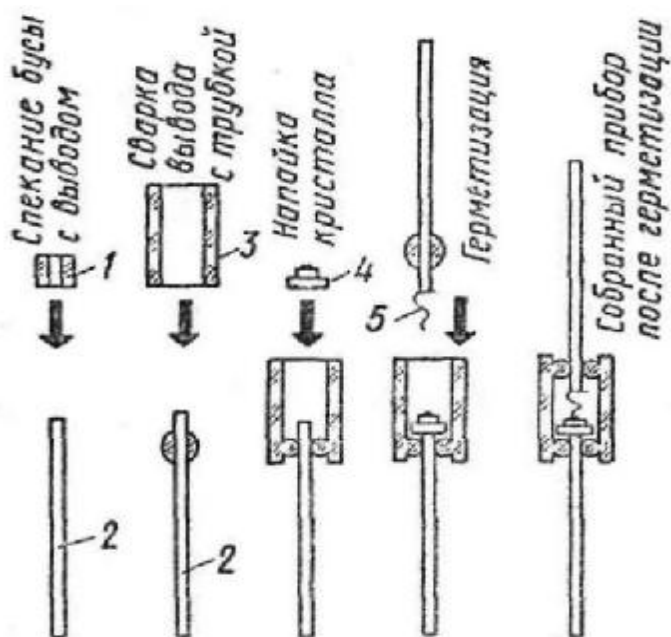


Рисунок 14.7 – Схема герметизации цельностеклянного корпуса радиационной заваркой стеклом

1 – нагревательная спираль; 2 – держатель с контактной пружиной; 3 – трубка с выводом и кристаллом

Сущность способа герметизации заваркой стеклом заключается в создании монолитной герметичной конструкции за счет соединения с собой стеклянных узлов (стекла со стеклом) или стеклянных узлов с металлическими (спай стекла с металлом). Схема изготовления данной конструкции выпрямительного диода, загерметизированной заваркой стеклом, показана на рис. 14.7.

В полупроводниковой промышленности герметизация стеклом осуществляется в основном радиационным нагревом и реже нагревом пламенем. Способ радиационного нагрева широко применяют из-за хорошей воспроизводимости технологического процесса и возможности получения стабильных режимов заварки.

Герметизацию ИС пластмассой выполняют несколькими методами, основными из которых являются: заливка в съемные формы и корпус, окунание и обволакивание, литьевое (трансфертное) и компрессионное прессование. Заливку в съемные формы (свободную заливку) применяют преимущественно при групповой технологии изготовления ИС. При этом методе в открытую часть формы, предварительно загруженной металлической арматурой и кристаллами ИС, заливают пластмассу (компаунд) и нагревают ее для полимеризации. Герметизированные приборы извлекают из формы, которую снова используют для заливки.

Заливка в корпусе отличается от заливки в съемные формы тем, что заливочной формой в этом случае является часть герметизируемого корпуса. Окунание и обволакивание применяют для дополнительной герметизации приборов или в качестве основного метода герметизации бескорпусных приборов.

При литьевом прессовании — наиболее распространенном методе пластмассовой герметизации — используют как термопластичные, так и термореактивные пластмассы. Сущность этого метода состоит в том, что дозированную пластмассовую таблетку (или порошок) расплавляют до заливки вне литьевой формы, а заливка происходит при дополнительном повышении жидкотекучести пластмассы и незначительном увеличении давления.

Непосредственно перед герметизацией перфоленту определенной формы и длины со смонтированными ИС укладывают, фиксируя по перфорации, в пресс-формы, которые закрывают, и производят прессование. В процесс прессования — заливки пресс – формы — входят следующие операции: загрузка перфоленты и смыкание литьевой формы (а), загрузка пластмассовой таблетки (б), ввод пуансона (трансфера) в литьевую форму (в), расплавление пластмассы под высоким давлением (г), заливка формы пластмассой под низким давлением и выдержка (д), размыкание литьевой формы и съем изделия (е).

Компрессионное прессование менее распространено, чем литьевое. Сущность этого метода состоит в том, что плавление герметизирующего

материала и заливка им ИС осуществляется в пресс-форме и с частичной полимеризацией. Пресс-форма для компрессионного прессования имеет обогрев верхней и нижней частей (матрицы и пуансона). В нижнюю часть помещают таблетку пластмассы, на нее —металлическую арматуру герметизируемых ИС, а затем — вторую таблетку пластмассы. Далее обе части формы соединяют. При нагревании и под действием давления пластмасса переходит в пластичное состояние, заполняет все полости рабочего объема пресс-формы и полимеризуется. После этого пресс-форма раскрывается и из нее выталкиваются загерметизированные приборы. Для герметизации ИС пластмассой используется следующий комплект оборудования: пресс для литьевого или компрессионного прессования, машина для изготовления таблеток из пластмассы, подогреватель для таблеток, пресс-формы и пресс со штампом для отделения загерметизированных ИС друг от друга.

Установка УГП-50 для герметизации ИС пластмассой оборудована электрическими подогревателями верхней и нижней частей пресс-формы. Удаление загерметизированных ИС производится верхними и нижними эжекторными толкателями. Для зажима пресс-формы служит установленная в рабочем пространстве пресса гидравлическая система. При зажиме и освобождении (разъеме) пресс-формы зажимное устройство действует с различными регулируемыми скоростями: при закрытии пресс-формы оно быстро закрывается, при освобождении вначале открывается медленно (в этот момент происходит выталкивание залитых пластмассой ИС), а затем скорость увеличивается, причем эту скорость можно регулировать. Зажимное устройство имеет предохранительное приспособление для пресс-формы на случай, если перфолента будет уложена неправильно. Таким образом, вероятность повреждения пресс-формы в прессах сведена к минимуму. Конструкцией пресса предусмотрена также регулировка высоты рабочего пространства для закрытых пресс-форм различной высоты.

Для герметизации ИС применяют одно- и многоместные съемные и стационарные пресс-формы. Качество герметизации ИС в большой степени зависит от конструкции и качества изготовления пресс-формы.

Испытания на герметичность проводят в два этапа.

На первом этапе отбраковываются приборы с натекаемостью менее 10^{-8} м³·Па/с. К этим методам относятся масс-спектроскопический, галогенный, радиоактивный. На втором этапе выявляются грубые течи. Они обнаруживаются, например, по образованию пузырьков при погружении изделия в жидкость.

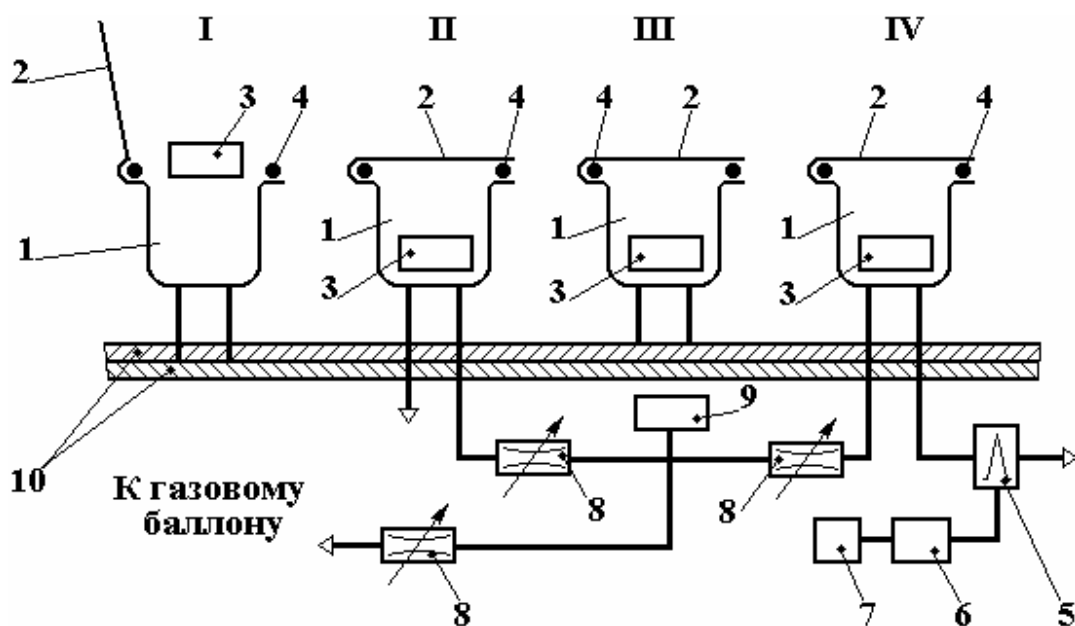


Рисунок 14.8 - Установка контроля герметичности электронно-захватным методом

1 – рабочая камера, 2 – крышка, 3 – изделие, 4 – уплотнитель, 5 – электронно-захватный детектор, 6 – измерительный блок, 7 – сигнализатор брака, 8 – регулятор расхода газа, 9 – контрольный манометр, 10 – диски золотника

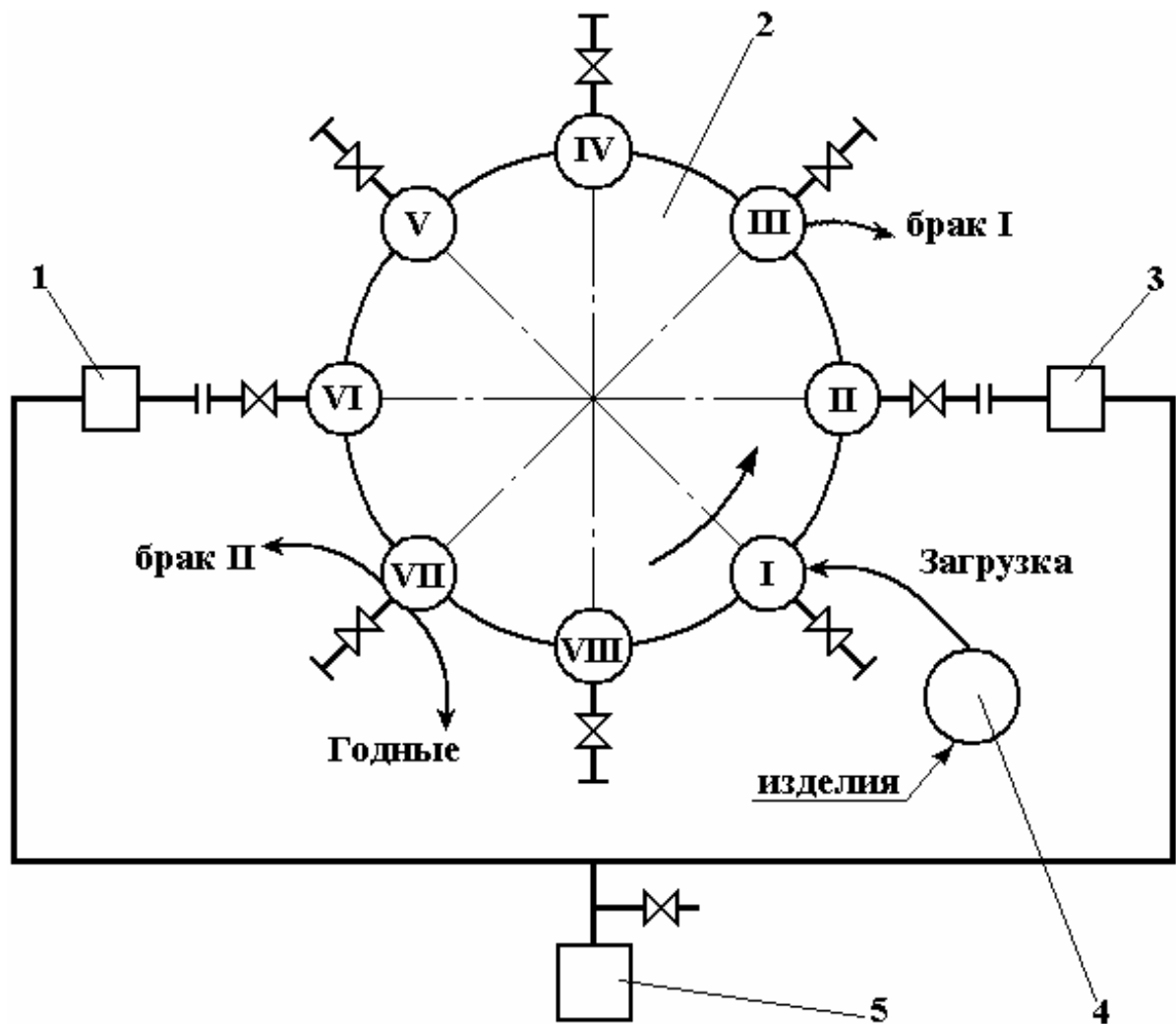


Рисунок 14.9 - Установка контроля герметичности диффузионно - магниторазрядным методом

1 – устройство разбраковки малых течей, 2 – зона накопления гелия, 3 – устройство разбраковки больших течей, 4 – устройство дополнительной опрессовки, 5 – форвакуумный насос

Контрольно - измерительное и испытательное оборудование

В производстве ИС важное место принадлежит контролю качества проведения технологического процесса, состоящего из нескольких десятков различных операций и переходов. несовершенство и нестабильность отдельных технологических операций и оборудования, приводящие к невоспроизводимости и разбросу параметров изготовленных структур, ошибки операторов делают неизбежным появление дефектов в процессе изготовления ИС. Поэтому для обнаружения дефектов и устранения дефектных структур из последующего цикла изготовления, а также для проверки соответствия изготовленной ИС требованиям технических условий используется контрольно-измерительное оборудование.

Различают два вида контроля ИС: производственный и контроль готовых структур. Производственный контроль является составной частью технологического процесса и направлен на обнаружение явных и скрытых дефектов. Этот контроль может носить как пассивный, так и активный диагностический характер. Производственный контроль охватывает целый комплекс различных физических, химических и электрических методов измерений как материалов, полуфабрикатов, структурных элементов и готовых ИС, так и технологических режимов и параметров отдельных операций.

Контролируется качество обработки полупроводниковых подложек, эпитаксиально выращенных полупроводниковых пленок, а также диэлектрических, металлических, магнитных и других пленок, качество диффузии и ионного легирования, отжига полупроводниковых структур, качество проведения микролитографии, травления, сборочных и заключительных операций.

Разработано большое число методов анализа поверхности и приповерхностных слоев. Эти методы классифицируются по типам возбуждающего и регистрируемого излучений, приняты следующие обозначения: ЭСХА — электронная спектроскопия для химического анализа; УФЭС — ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия; ЭЗМА — электронно-зондовый микроанализ; СПВ — спектроскопия потенциалов возбуждения; ЭМ — электронная микроскопия; РЭМ — растровая ЭМ; ОЭС — Оже-электронная спектроскопия; ДМЭ — дифракция медных электронов; ДБЭО — дифракция быстрых электронов на отражение; ИС — ионизационная спектроскопия; СПЭ — спектроскопия потерь энергии; ЭФИБ — эмиссия фотонов при ионной бомбардировке; ИОЭС — ионная Оже-электронная спектроскопия; РИНЭ — рассеяние ионов низких энергий; РИВЭ — рассеяние ионов высоких энергий; МСВИ — масс-спектроскопия

вторичных ионов; ИМА — ионно-зондовый микроанализ; ПМЗ — протонный микрозонд.

Для исследования образцов указанными выше методами необходимо осуществлять их препарирование. Послойное стравливание образцов проводят с помощью избирательных травителей, воздействующих либо на пленку, либо на подложку. Все большее распространение для препарирования образцов находит метод ионного распыления. При этом одновременно с распылением.

Полупроводниковые приборы и микросхемы применяют в разнообразной аппаратуре, работающей в самых различных условиях: при повышенной влажности, резком изменении температуры и т. п.

Почти для всех видов аппаратуры (в особенности космической, авиационной, медицинской, корабельной) необходимы долговечность и практическая безотказность комплектующих полупроводниковых приборов и микросхем в течение всего времени их работы и хранения. Высокая надежность приборов и микросхем обеспечивается не только качеством и воспроизводимостью технологии их изготовления, но и полнотой отбраковочных испытаний и контроля на всех стадиях производства.

После сборочных операций приборы или микросхемы должны пройти ряд технологических (отбраковочных) испытаний, включающих в себя комплекс различных воздействий, измерение основных электрических параметров и визуальный контроль. Это обусловлено тем, что отдельные приборы после сборки могут иметь скрытые дефекты, образованные вследствие несовершенной конструкции и отклонения технологических режимов при монтаже и герметизации; они не выдержат длительной работы в устройствах при различных воздействиях, которые оговорены техническими условиями. В результате технологических испытаний такие изделия отбраковывают.

Выдержавшими испытания считаются приборы и микросхемы, которые после испытаний не изменили своей конструктивной формы и внешнего вида, сохранили герметичность корпуса и электрические параметры.

В полупроводниковой промышленности установлены следующие виды технологических (отбраковочных) испытаний

и контроля: визуальный контроль до герметизации; механические, климатические и электрические испытания после герметизации; проверка герметичности; визуальный контроль внешнего вида; рентгенотелевизионный контроль.

Состав и последовательность технологических испытаний (табл. 24) устанавливают в технологической документации, исходя из особенностей конструкции приборов и микросхем и технологических процессов их изготовления с учетом видов дефектов и механизмов отказов, характерных для данного типа изделия и его назначения.

Визуальный контроль приборов и микросхем проводят до и после герметизации. Визуальным контролем до герметизации устанавливают состояние поверхности кристалла, элементов конструкции и качества

монтажа, а после герметизации — дефекты приборов и микросхем, возникшие при их герметизации. При контроле рекомендуется использовать образцы внешнего вида прибора или микросхемы, рисунки и фотографии, иллюстрирующие дефекты, по которым бракуется прибор.

Рентгенотелевизионный контроль проводят с целью непосредственного наблюдения и исследования внутренней структуры приборов и микросхем. Он предназначен для дополнительной проверки качества сборки и оценки эффективности визуального контроля до герметизации.

Климатические испытания включают испытания на воздействие повышенной температуры, на воздействие смены температур и на влагостойкость.

Испытания на воздействие повышенной температуры предназначены для стабилизации параметров. Их проводят в камерах теплоты, обеспечивающих заданную температуру (от 70 до 200 °С) в течение заданного времени. Рекомендуемая длительность термовыдержки 48 ± 4 ч. Режимы указываются в технологической документации.

Испытания на воздействие смены температур (термоциклирование) применяют для проверки качества выполненных ранее различных внутренних соединений прибора, прочности металлостеклянных спаев, качества защиты. Изделия подвергают воздействию не менее трех непрерывно следующих друг за другом циклов. Каждый цикл состоит из двух этапов выдержки изделий в камерах теплоты и холода, обеспечивающих заданный режим. В камере теплоты и холода (рис. 133) устанавливается заданный температурный режим не более чем за 5 мин после загрузки в них приборов. Нижнее значение температуры устанавливается — 60 °С, верхнее выбирают из ряда от 70 до 175 °С. Время переноса изделий из камеры холода в камеру теплоты и обратно не должно превышать 1 мин.

В настоящее время в промышленности при испытании на воздействие смены температур наиболее широко применяют специальные камеры РКТЦ-65-200. Циклическое изменение температуры вызывает изменения линейных размеров всех деталей приборов и микросхем. Ненадежные спаи дадут трещины, обрывы, плохое лаковое покрытие может обнажить электрический переход. Приборы с нарушениями обнаруживают путем внешнего осмотра и измерения основных электрических параметров.

Испытание на влагостойкость применяют для выявления дефектов пластмассовых конструкций. Изделия выдерживают в камере влажности при 50 или 85 °С и относительной влажности $85 \pm 3\%$ или $95 \pm 3\%$ не менее 2 сут.

В камере влажности устанавливаются заданные значения температуры и влажности. Она выполнена в виде шкафа и состоит из каркаса с обшивкой, рабочей камеры, систем нагрева и автоматического регулирования теплоты, систем создания и автоматического регулирования влажности.

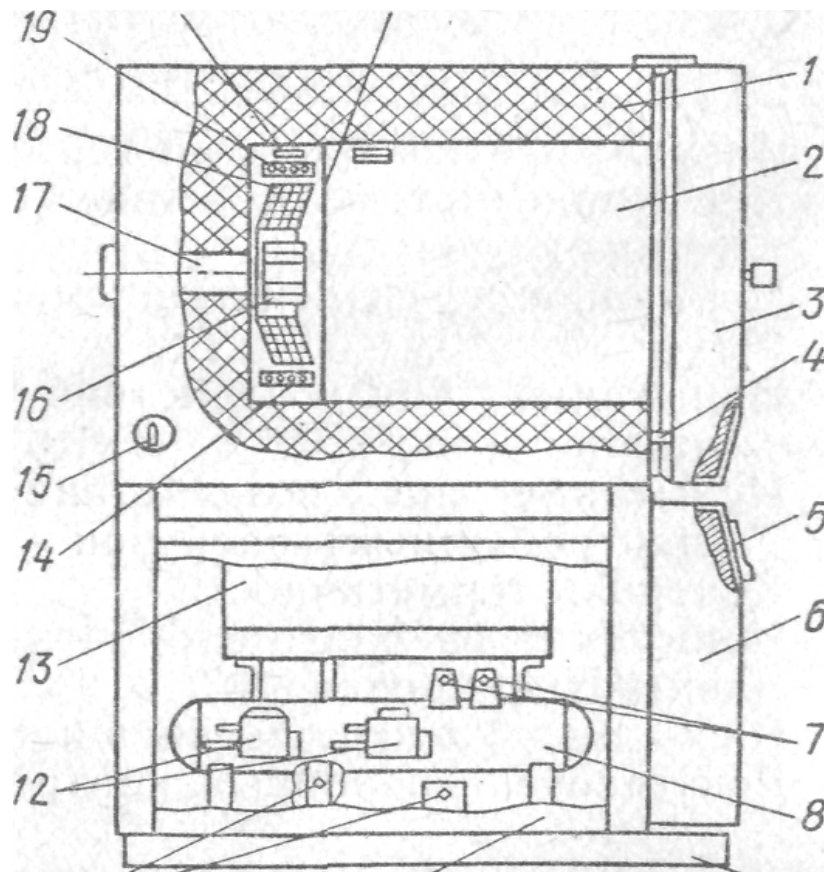


Рисунок 15.1- Камера теплоты и холода КТХ-0,4-65/155

1 – пенопласт, 2 – рабочий объем камеры, 3 – дверь, 4 – блокировочная кнопка, 5 – панель управления, 6 – пульт управления, 7, 11 – запорные вентили, 8 – конденсатор, 9 – каркас, 10 – съемная панель, 12 – реле давления, 13 – конденсатор-испаритель, 14 – нагреватель, 15 – выключатель, 16 – вентилятор, 17 – привод вентилятора, 18, 19 – испарители фреона-22 и фреона-13, 20 – датчики температуры, 21 – перегородка.

Испытания на стойкость к механическим воздействиям служат для проверки механической прочности конструкции и качества выполненных ранее внутренних соединений (приварка выводов, спаев керамики и стекла с металлами и пр.). С помощью этих испытаний устанавливают, не образуются ли кратковременные либо постоянные короткие замыкания или обрывы.

Как указывалось выше, в технологии изготовления полупроводниковых приборов и микросхем используют испытания на воздействие одиночных ударов и испытания на воздействие линейных (центробежных) нагрузок.

При испытании на воздействие одиночных ударов приборы с помощью специального приспособления жестко закреплены на платформе испытательной установки. Величина ускорения и длительность ударного импульса указываются в технологической документации. На рис. 134 показана кинематическая схема ударного стенда.

Принцип действия ударного стенда основан на свободном падении стола (массивной стальной плиты) с испытываемыми изделиями; падая, плита ударяется об опоры.

Передача ударных нагрузок осуществляется по следующей кинематической цепи. От электродвигателя 7 вращение передается на червячный редуктор 8 и горизонтальный вал 9. На валу жестко закреплен кулачок 10, на который опирается вертикальный шток 4. На штоке смонтирована ударная пружина 6, которая нижним концом упирается во фланец, жестко закрепленный на штоке, а верхним — в стакан планки 5. Планка регулировочными винтами // связана с плитой основания стенда. При изменении длины пружины изменяется ударная нагрузка. Ударные импульсы устанавливаются с помощью линейки 12. При совмещении стрелки, расположенной на планке 5, можно быстро налаживать стенд на заданные ударные нагрузки.

Верхний конец штока 4 оканчивается фланцем, который через стержень 14 связан со стаканом 3. Ударный импульс возникает после удара штока 4 в стакан 3 под действием ударной пружины. Между корпусом стенда 1 и плитой 2, а также между стаканом 3 и направляющей установлены прокладки 15, оказывающие влияние на длительность ударного импульса. Плита 2 фиксируется на колонках 13.

При вращении кулачка 10 шток поднимается вверх, сжимает ударную пружину и поднимает направляющие с плитой на 3—4 мм. При падении штока под действием ударной пружины ударяет в стакан, удар передается на плиту и корпус с приборами. Частота ударов регулируется частотой вращения электродвигателя от пульта управления.

Отдельные типы микросхем и особенно приборы в микромодульном исполнении подвергаются испытаниям на удар с индикацией обрывов электродов путем простукивания специальным механическим молоточком. Микросхемы или приборы загружаются в специальные зажимы, укрепленные на плите приспособления, по которым с определенной силой и частотой ударяет механический молоточек. При наличии кратковременного обрыва в испытываемой интегральной микросхеме с резистора снимается положительный импульс напряжения, который фиксируется индикаторным устройством.

Испытание на воздействие линейных (центробежных) нагрузок предназначено для выявления приборов с дефектами монтажа и ослабленными узлами соединений выводов и корпуса.

Приборы или микросхемы с помощью специального приспособления закрепляют на роторе центрифуги так, чтобы обеспечить приложение линейного ускорения заданной величины и направления. Величина линейного ускорения устанавливается в технологической документации исходя из особенностей конструкции прибора

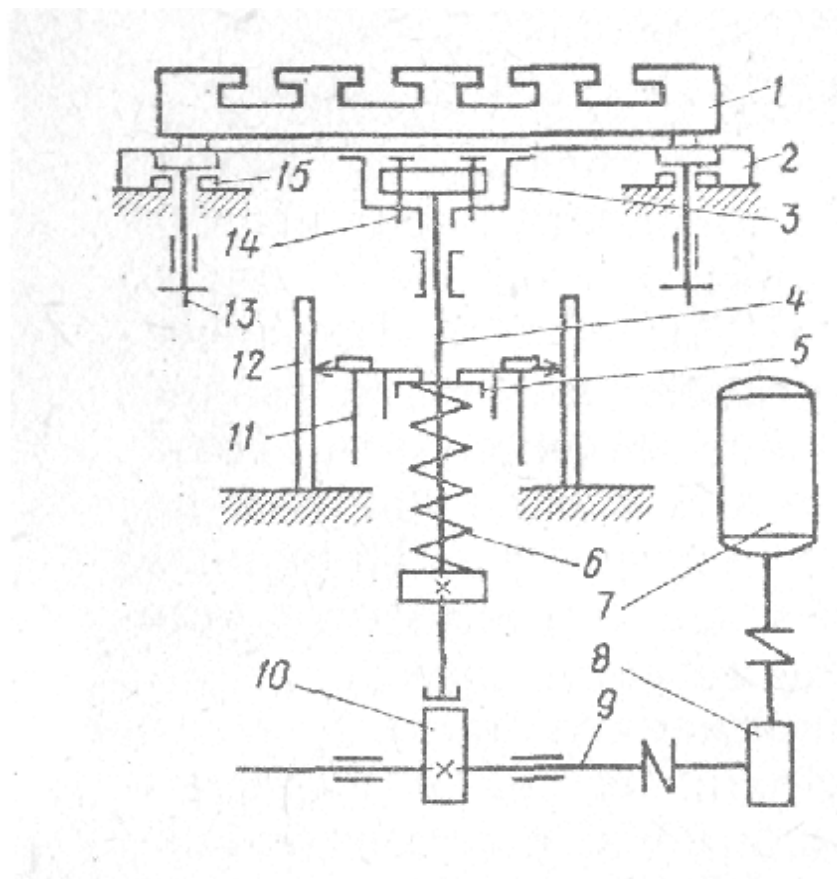


Рисунок 15.2 – Кинематическая схема ударного стенда
 1 –стол стенда, 2 –плита, 3 –стакан, 4 –шток, 5 – планка,6- ударная пружина,7- электродвигатель,8- червячный редуктор,9- горизонтальный вал, 10- кулачок, 11- регулировочный винт,12- линейка,13- колонка,14- стержень,15- резиновые прокладки

Испытания проводят при воздействии линейного ускорения в одном наиболее опасном направлении. Продолжительность воздействия 1 мин.

В процессе производства полупроводниковых приборов и ИС подложки проходят через большое число операций (до 200). Однако в процессе производства только несколько десятков ключевых операций (20-50) имеют прямое влияние на характеристики приборов.

Производственный контроль включает:

- Контроль технологических процессов;
- Операционный контроль;
- Приемочный контроль.

Что должны контролировать и измерять ?

1. Геометрические размеры элементов (ширина, толщина, глубина залегания, рельеф травления).

2. Электрофизические характеристики слоев (ρ_v , ТКС, концентрация, профиль концентрации, ϵ , $\text{tg } \delta$, $E_{пф}$, N_{ss} , ВАХ, ВФХ, тип проводимости).

3. Химические (состав, скорость травления).

4. Механические характеристики (механические напряжения, плотность, твердость, трибологические характеристики, адгезия).

5. Кристаллографические характеристики (структура, наличие дефектов, размер зерна, и т. п.)

К жесткому коромыслу 4, установленному на шарнире 6, прикреплена корундовая игла 3 и подвижный груз W_0 , служащий для компенсации веса индентора. Механизм 5 обеспечивает мягкое опускание иглы под действием нагрузки W на образец 2.

- Метод нормального отрыва;
- Метод липкой ленты.

Таблица 15.1- Состав и последовательность технологических испытаний

Вид контроля и испытаний	Приборы в пластмассовом корпусе не имеющие внутренних полостей	Приборы имеющие внутреннюю полость
§ Визуальный контроль для герметизации	+	+
§ Испытание на воздействие повышенной температуры	+	+
§ Испытание на термоцикличность	+	+
§ Испытание на воздействие одиночных ударов		+
§ Испытание на воздействие линейных нагрузок		+
§ Контроль герметичности		
§ Испытание на влагостойкость	+	+
§ Электротренировка	+	+
§ Визуальный контроль внешнего вида	+	+
§ Рентгенотелевизионный контроль		

Климатические испытания включают испытание на воздействие повышенной температуры, смены температуры и на влагостойкость. Для

м/схем специального назначения добавляются испытания на морской туман, испытания на грибок.

Испытания на повышенную температуру проводят при 70-200⁰С в течение 48 ±44.

Испытание на воздействие смены температуры проводят при-60⁰С до или 175⁰С

Испытание на влагостойкость: T=50 и 85⁰С; влажность 85 ±3% или 95 ±3% в течение 48 часов.

Полупроводниковые приборы и м/схемы, применяются в разнообразной аппаратуре, работающей в самых разнообразных условиях, при повышенной влажности, резком изменении температуры и т.д.

Почти для всех видов аппаратуры (в особенности для космической, авиационной, корабельной и медицинской) необходима долговечность и практическая безотказность в течение всего времени работы и хранения.

После сборочных операции приборы или м/схемы должны пройти ряд технологических (отбраковочных) испытаний. Выдержавшими испытания считаются приборы и м/схемы, которые не изменили своей конструктивной формы и внешнего вида, сохранили герметичность корпуса и электрические параметры.

Рентгенотелевизионный контроль.по сравнению с оптической микроскопией обладает более высокими значениями пространственного разрешения и глубины резкости, а также возможностью одновременного проведения химического атомарного анализа.

На рисунке представлена блок-схема растрового ЭМ. Электроны генерируются э/пушкой с ускорением напряжения 0,5-25КВ, затем фокусируются в пучок малого диаметра, 0,1-1 мкм, разворачиваемый в растр на поверхность образца. При этом возбуждаются 3 типа излучения: рентгеновское, вторичные электроны и отраженные электроны.

Ток вторичных электронов используется для модуляции интенсивности электронного луча в ЭЛТ. Поскольку развертка электронного луча в ЭЛТ синхронизирована с разверткой первичного э/пучка, на экране ЭЛТ формируется изображение поверхности образца, яркость отдельных элементов которого определяется изменениями интенсивности вторичных или отраженных электронов.

Для проведения химического анализа используется рентгеновское излучение.

Просвечивающая электронная микроскопия

ПЭМ обеспечивает высокое пространственное разрешение (0,2 нм). Электронный пучок с энергией 75-125 кэВ проходит сквозь образец с толщиной ≤100нм и формирует изображение, передающее структурные и морфологические особенности образца. Изображение образца отображают на флуоресцентном экране. Экран можно заменить фотопленкой или фотопластинкой.

Если образец невозможно утонить, то используются т.н. реплики (тонкий слой покрытия из органических и неорганических материалов).

Наносят материал хорошо поглощающий электроны. Современные ПЭМ дают увеличение до 1000000.

Работа ПЭМ в режиме микродифракции

Используется для определение кристалличности вещества и о его фазовом составе. Физический смысл дифракционной картины заключается в том, что наблюдаемая электроннограмма, представляет собой плоское сечение пространства в котором распределены электроны, после того, как они прошли через вещество.

Интенсивность колец отражает степень текстурированности, т.е. тенденцию ориентации зерен вдоль какого-либо направления.

Оборудование для подготовки технологических сред

16.1 Оборудование для обеспечения производственной гигиены

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Пылезащитные камеры с вертикальным ламинарным потоком воздуха, предназначенные для выполнения операций без выделения продуктов химических реакций и с выделением их, показаны на рис. 16.1, *а*, *б*. Воздух из помещения засасывается вентилятором 4 через воздухозаборную решетку 3 с фильтром предварительной очистки, очищается высокоэффективным фильтром 2 и подается в пылезащитную камеру.

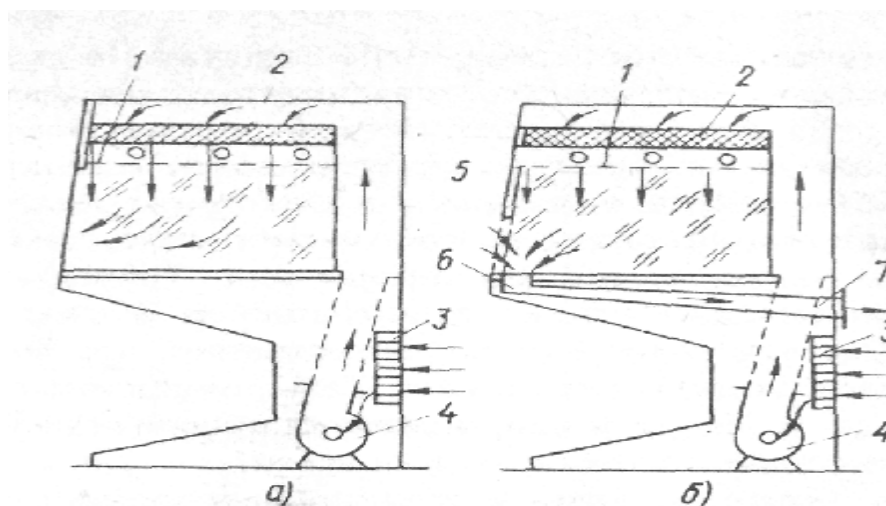


Рисунок 16.1 – Пылезащитные камеры с вертикальным ламинарным потоком воздуха для выполнения операций:

а – без выделения продуктов реакций, *б* – с выделением продуктов реакций; 1- перфорированная решетка, 2 – высокоэффективный фильтр, 3 – воздухозаборная решетка с фильтром предварительной очистки воздуха, 4 – вентилятор, 5 – подъемная стеклянная шторка, 6,7 – отверстие и воздухопровод для удаления загрязненного воздуха

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

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

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

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

Ламинарный воздушный поток может быть реализован во всем объеме чистого производственного помещения (ЧПП) или на отдельных рабочих местах (чистый коридор) (рис. 16.2 – 16.3).

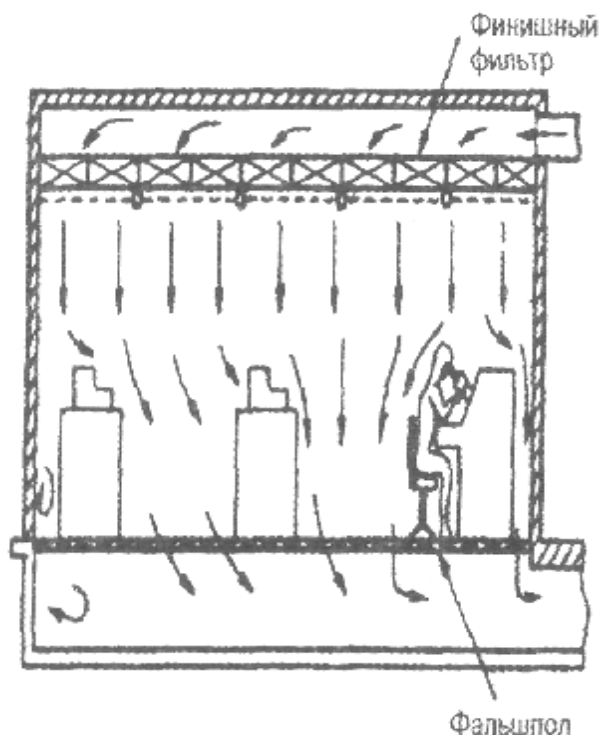


Рисунок 16.2 – Схема ЧПП с вертикальным ламинарным потоком

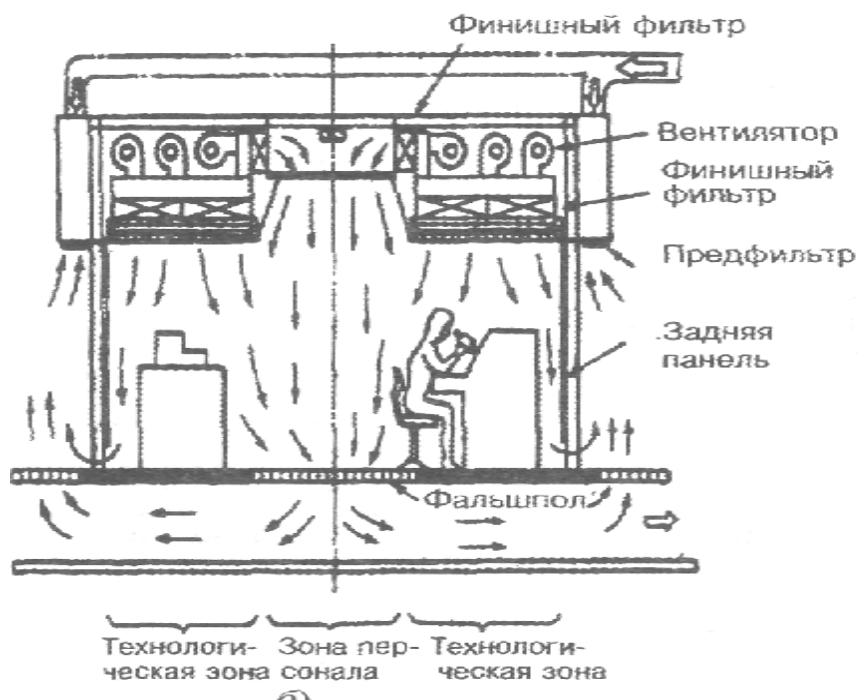


Рисунок 16.3 – Схема ЧПП с чистым коридором

Использование локальных чистых объемов позволяет понизить класс остального помещения на 1-2 порядка при значительном понижении энергопотребления. Локальный чистый объем реализуется в виде пылезащитных камер или стандартных механических интерфейсов.

16.2 Технологические среды

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

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

Очищают газы в специальных установках (рис. 16.4). Очищаемый водород через ротаметр 1 подают в реактор 3 с палладированным алюмогелем, где происходит каталитическое связывание кислорода с водородом, в результате которого образуется вода. При очистке азота и аргона от кислорода водород специально в оптимальных количествах вводят в реактор 3 через ротаметр 7 и дозатор 2. Чтобы исключить конденсацию образовавшейся воды, реактор подогревают.

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

Для окончательной осушки очищаемых газов служат два работающих поочередно адсорбера 7, заполненные в зависимости от необходимой степени осушки силикагелем или цеолитом*. При работе одного из адсорберов в другом происходит регенерация адсорбента азотом (или воздухом), который, проходя через вентили 8 и подогреватель 9, нагревается до необходимой

температуры. Регенерируют адсорбент в течение времени, необходимого для восстановления его полной работоспособности. Очищенный и осушенный газ направляется к потребителю через вентиль 8 и фильтр 6, служащий для улавливания механических примесей, выносимых газом из установки очистки.

Очисткой по такой технологической схеме получают аргон и азот с содержанием кислорода до $5 \cdot 10^{-4}\%$ и точкой росы от -60 до -70 °С и водород — с содержанием кислорода до $1 \cdot 10^{-4}\%$ и точкой росы от -65 до -70 С. Для некоторых современных технологических процессов (например, эпитаксии) требуется водород повышенной чистоты, близкой к спектральной. Получают такой водород диффузионной очисткой, пропуская его через металлическую перегородку или мембрану из сплава палладия с платиной, серебром, золотом или другими металлами.

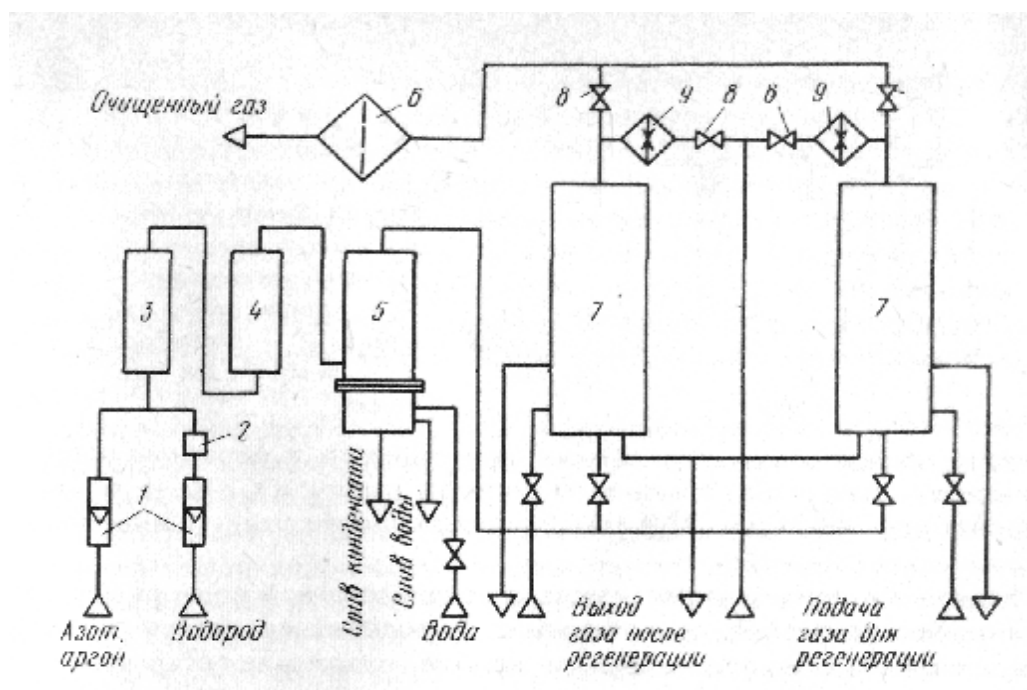


Рисунок 16.4 – Схема установки очистки газов:

1 – ротаметры, 2 – дозатор водорода, 3,4 – реакторы с палладированным алюмогелем и оксидом меди, 5 – холодильник, 6 – фильтр, 7 – адсорбенты, 8 – вентили, 9 – подогреватели воздуха (азота) для регенерации

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

Схема получения чистой воды для чистых производственных помещений показана на рис. 16.5.

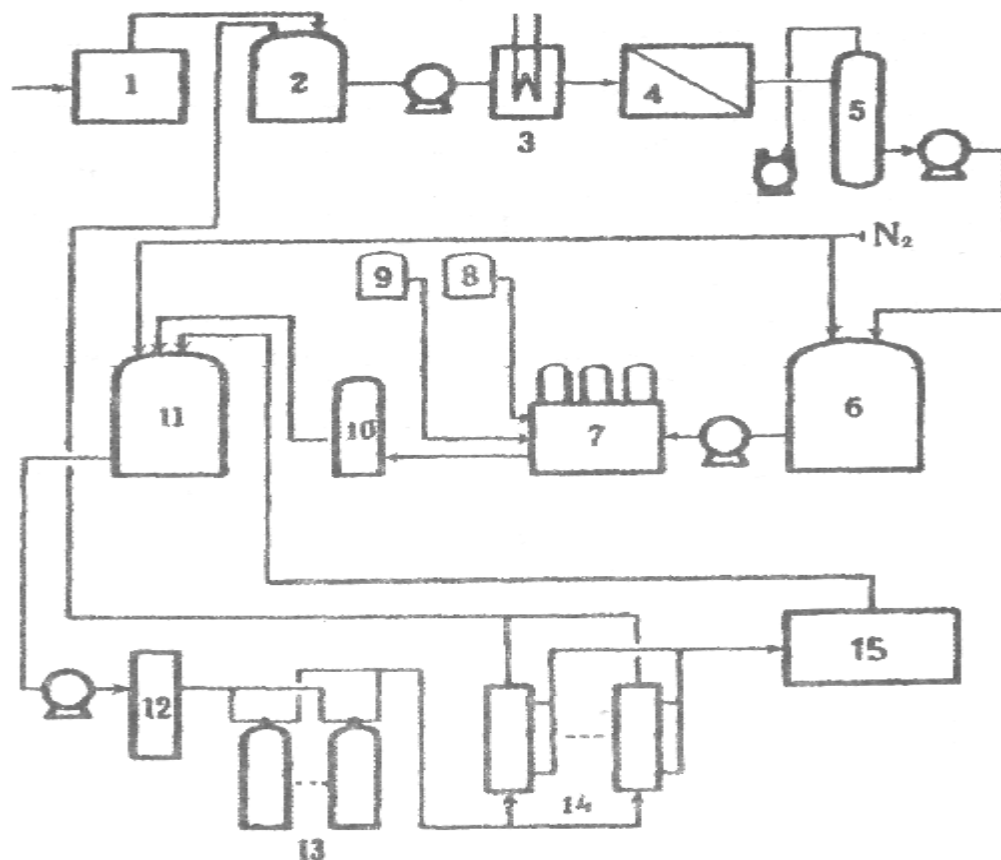


Рисунок 16.5 – Схема получения сверхчистой воды для ЧПП

1 – предварительная обработка, 2 – для исходной воды, 3 – теплообменник, 4 – установка обратного осмоса, 5 – колонна для вакуумного безгаживания, 6 – емкость для воды после обратного осмоса, 7 – колонна с ионообменными смолами, 8 – емкость для соляной кислоты, 9 – емкость для едкого натра, 10 – мембранный фильтр, 11 – емкость для чистой воды, 12 – установка для уничтожения микробов, 13 – колонна для доводки ионообменными смолами, 14 – установка ультраfiltrации, 15 – место использования

Первичная стадия обработки исходной воды включает предварительную обработку (отстой, фильтрацию, адсорбцию) в зависимости от содержания в исходной воде примесей, обратный осмос, ионообменную очистку, вакуумное обезгаживание, фильтрацию через мембранный фильтр с размером пор 0,2 мкм и хранение в емкости для чистой воды, в которой воздух заменен азотом. В процессе удаляется большая часть микрочастиц и микроорганизмов, а удельное электрическое сопротивление воды достигает 10-15 Мом при температуре 25 °С.

На второй стадии вода обеззараживается УФ – излучением, освобождается от ионов высокочистыми ионообменными смолами, подвергается ультраfiltrации и подается на рабочие участки. Удельное сопротивление воды в результате такой обработки составляет 18 Мом.

Обработка ионообменными смолами основана на их способности связывать ионы растворимых в воде примесей в нерастворимые органические

соединения (рис. 16.6). Очищаемую воду последовательно пропускают через две колонки 1 и 3, заполненные смолами, соответственно поглощающими катионы (катионитами) и связывающими анионы (анионитами). Процессы обмена катионов и анионов, называемые катионированием и анионированием, получили широкое распространение в производстве полупроводниковых приборов и микросхем для смягчения, обессоливания и обескремнивания воды. Для удаления углекислого газа после катионирования служит дегазатор 2, в котором очищаемая вода продувается противотоком воздуха.

Продолжительность рабочего цикла ионообменных смол определяется их обменной емкостью, т.е. способностью к ионному обмену. После использования ионита до заданного предела обменной емкости необходимо восстановить его обменную способность, удаляя задержанные из обрабатываемой воды ионы и вводя взамен них ионы, которые он отдавал воде в период рабочего цикла. Таким образом, восстановление истощенного ионита является процессом ионного обмена, проводимого в обратном порядке. В качестве катионитов обычно применяют смолу КУ-2-82, а в качестве анионитов — АН-31 или ЭДЭ-10П. Выпускаются эти смолы в виде мелких гранул.

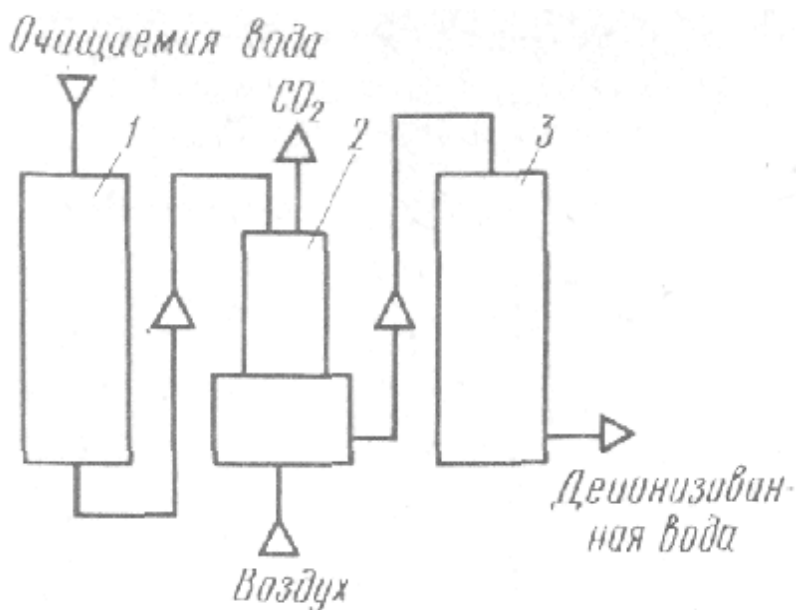


Рисунок 16.6 – Схема установки очистки воды ионообменными смолами: 1 – катионитовая колонка, 2 – дегазатор, 3 – анионитовая колонка

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

Установки централизованной очистки воды позволяют получать деионизованную воду, удельное электрическое сопротивление которой не ниже 2 МОм см. Выпускаемые промышленностью ионообменные установки

централизованной очистки воды УЦ-2, УЦ-5 и УЦ-10 (соответственно производительностью 2,5 и 10 м³/ч) построены по типовой технологической схеме и изготавливаются из унифицированных элементов.

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

16.3 Очистка полупроводниковых пластин, технологической оснастки и тары

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

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

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

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

Технологическую оснастку и межоперационную тару для обработки и переноса полупроводниковых пластин также тщательно очищают от всех видов загрязнений. Изготавливают оснастку и тару из особо чистых материалов: кварца, графита (для термических процессов), фторопласта, винилпласта (для химических процессов), нержавеющей стали, алюминия и

его сплавов, керамики, полиэтилена, полистирола и некоторых других пластмасс.

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

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

Автоматизированное и программно-управляемое технологическое оборудование

Автоматизация производственных процессов — одна из основных тенденций развития современного производства, обеспечивающая повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции, а также улучшение условий труда.

Непрерывное расширение работ по автоматизации производства микросхем подчинено, прежде всего, внутренней логике развития электронной техники, изделия которой практически невозможно изготавливать без использования средств автоматизации. Другой очень важный аспект развития процесса автоматизации — это улучшение экономических показателей производства и, прежде всего, снижение общих трудовых затрат на единицу продукции, снижение себестоимости изделий, увеличение процента выхода годных приборов. Последнее в ряде случаев дает экономию основных и вспомогательных материалов, превышающую экономию от сокращения количества операторов в несколько раз.

При комплексной механизации и автоматизации, особенно структурообразующей стадии производства, необходимо учитывать специфику конструирования оборудования, вытекающую из особенностей полупроводникового производства, а именно:

1. Большое количество (130—150) самых разнообразных по характеру выполнения операций (диффузия, фотолитография, вакуумное нанесение пленок и т. д.) затрудняет или делает невозможным объединение ряда процессов и, следовательно, агрегатирование машин.

2. Для выполнения ряда технологических операций возникает необходимость создавать специально для этих узких целей некоторые виды специфического оборудования, например оборудования для сборки приборов в различные типы корпусов: металлостеклянные, керамические, пластмассовые и т. п.

3. С целью исключения субъективного влияния оператора на ход технологического процесса и обеспечения высокой точности поддержания технологических параметров режимов обработки необходима высокая степень автоматизации технологического оборудования. Без решения этой проблемы невозможно обеспечить идентичность приборов, выпускаемых миллионными тиражами.

4. Массовость выпуска изделий с учетом многономенклатурности и динамичности развития микроэлектроники требует высокой мобильности как оборудования, так и komponуемых на его основе систем, т. е. способности оборудования быстро перенастраиваться с выпуска одного вида продукции на другой.

5. Необходимость соблюдения вакуумной гигиены требует герметизации или создания контролируемой газовой среды в зоне обработки при выполнении ряда технологических операций. А это влечет за собой необходимость создания шлюзов, транспортеров, накопителей длительного хранения, загрузочно-разгрузочных устройств, транспортной тары, предназначенных специально для обеспечения этих условий и сохранения их в процессе обработки.

6. При создании технологических линий возникает необходимость проектировать оборудование с различной производительностью с учетом переменного (по длине потока) и относительно невысокого процента выхода годных изделий. Это также затрудняет объединение машин в агрегаты и линии.

Все перечисленные выше особенности производства интегральных микросхем, которые необходимо учесть при конструировании оборудования, существенно усложняют и удорожают последнее и часто в результате в значительной степени снижается его надежность.

При проектировании оборудования микроэлектроники характерным является создание комплексов оборудования и технологических линий для проведения всего цикла технологических операций, начиная от заготовительных и кончая операциями герметизации, выходного контроля и упаковки готовой продукции, или, в отдельных случаях, для всех технологических операций участка. Это вызвано' разнообразием используемых технологических процессов, требующих для своего осуществления соответствующего оборудования, различиями в размерах исходных заготовок пластин, в размерах и типах корпусов и, наконец, большой номенклатурой и числом контролируемых параметров приборов.

Комплекс оборудования представляет собой полный набор технологически необходимого основного и вспомогательного оборудования, обеспечивающего заданный выпуск годной продукции, территориально объединенного в цех, участки или группы с нерегламентированным их расположением.

Это характерно для непоточного производства.

При разработке комплексов оборудования учитывают последовательность выполнения технологических операций на участке, особенности их выполнения, требования вакуумной гигиены, возможность и пути исправления брака. Комплексные разработки позволяют создавать комплексы оборудования в едином стиле, удовлетворяющие всем требованиям промышленной эстетики. При этом используют методы узлового (модульного) конструирования, что значительно повышает эффективность, надежность и долговечность оборудования.

Завершенность разработки и поставки комплексов оборудования значительно сокращают сроки подготовки производства, монтажа и ввода в эксплуатацию оборудования, а также сроки достижения их проектной мощности.

Современные комплексы оборудования могут насчитывать сотни установок более 50—60 наименований, отличающихся друг от друга методами обработки изделий, точностью, производительностью, уровнем механизации и автоматизации. Так, например, комплекс оборудования «Корунд», предназначенный для массового изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на подложках 0 70 мм, охватывает все технологические процессы изготовления структур, сборки в пластмассовый корпус на отрезках ленты, контроля электрических параметров и испытаний приборов. Некоторые установки из числа входящих в комплекс рассмотрены нами ранее. Оборудование комплекса оснащено высоконадежными прецизионными системами автоматического регулирования и программирования термическими камерами и реакторами с высокой равномерностью температурного поля и управления газовыми потоками.

Многие узлы, электрические блоки установок, а также пылезащитные камеры с ламинарным потоком обеспыленного воздуха унифицированы. В состав оборудования входит система централизованного управления комплексом с использованием ЭВМ, предусматривающая сбор и обработку статистической информации о работе комплекса с выводом данных на центральный пульт.

Весь комплекс разбит на участки: фотолитографии, диффузии, теххимии, вакуумного нанесения пленок, измерения параметров, сборки. На границах участков имеются накопители с автоматизированным учетом обрабатываемых партий пластин и длительности их межоперационного хранения в потоке обеспыленного осушенного азота (с ограничением или без ограничения времени хранения). Применение накопителей в комплексе позволяет повысить процент выхода годных изделий и увеличить коэффициент загрузки оборудования.

Виды поточных линий

Следует иметь в виду, что массовость выпуска не всегда определяет метод производства. В приборостроении существуют три типа производства — единичный, серийный и массовый, а методов производства только два — непоточный и поточный.

Не поточным называют метод производства, при котором изделия обрабатывают партиями на каждой операции, обрабатывающее оборудование размещают группами (по типам) без определенной связи с последовательностью выполнения операций.

Поточным называют метод производства, при котором операции обработки или сборки закреплены за определенным оборудованием или рабочими местами, расположенными в порядке выполнения операций, а обрабатываемое изделие передается с одной операции на другую сразу после выполнения предшествующей операции вручную или при помощи транспортных устройств.

Основой поточного производства является поточная линия. Поточная линия представляет собой группу обрабатывающих машин, каждая из которых специализирована на выполнении одной или нескольких однотипных операций, размещенных в порядке выполнения операции обработки или сборки и снабженных простейшим транспортным устройством для передачи деталей с одной позиции на другую. Рис. 147 дает представление о разнообразии конструктивно-технологических схем исполнения поточных линий.

По степени механизации и автоматизации технологических операций линии делят на механизированные, комплексно-механизированные, автоматические и полуавтоматические (автоматизированные).

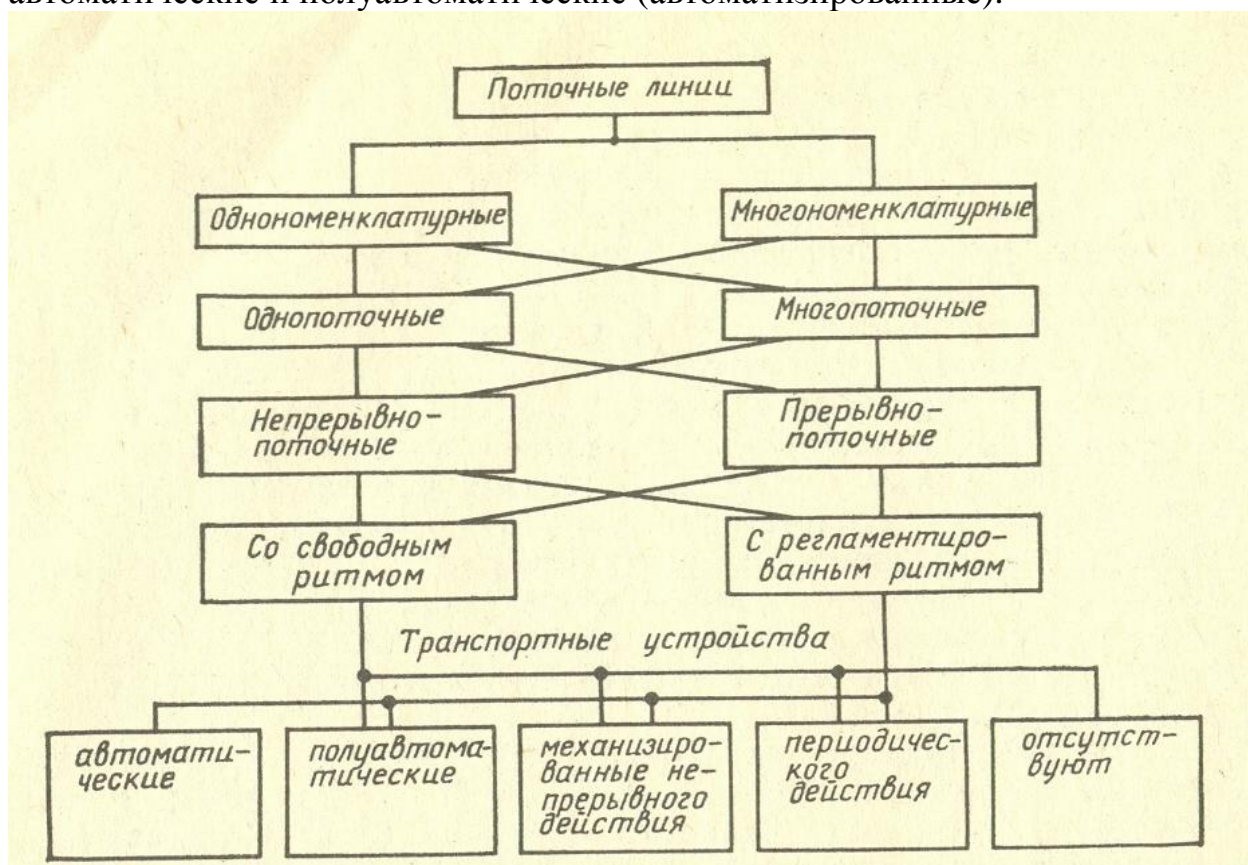


Рисунок 17.1-

Варианты конструктивно-технологических схем поточных линий.

Механизированная линия — это линия, в которой большая часть операций выполняется с помощью машин и других механических устройств, но некоторые основные и вспомогательные операции выполняют вручную вследствие невозможности или нецелесообразности их механизации; при этом процессы перемещения обрабатываемых изделий от одного рабочего места к другому механизированы.

Комплексно-механизированная линия — линия, в которой с помощью механизмов и машин осуществляются все без исключения основные, вспомогательные и обслуживающие операции, входящие в состав части или всего технологического процесса изготовления изделия.

Автоматическая линия — система машин, расположенных в технологической последовательности, на которой все основные, вспомогательные и другие операции выполняются автоматически при помощи автоматов и автоматических устройств без применения ручного или механизированного труда, за исключением функций наладки, наблюдения и контроля.

Полуавтоматическая, или автоматизированная линия, — линия, в которой наряду с операциями, выполняемыми автоматически, частично совершаются и некоторые вспомогательные ручные операции. В зависимости от характера движения изделий по операциям производственного процесса (по степени непрерывности производственного процесса) следует различать непрерывно-поточные и прерывно-поточные линии.

Непрерывно-поточные линии — линии, на которых длительность всех операций производственного процесса равна или кратна ритму линии.

В непрерывно-поточных линиях работа всех машин синхронизирована во времени. Ритм непрерывно-поточных линий может быть принудительным (регламентированным) или свободным, поддерживаемым самим рабочим.

Прерывно-поточные линии — линии, на которых длительность операций (всех или части из них) не выровнена согласно ритму линии. Прерывно-поточные линии являются преобладающим типом поточных линий в производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Линии разделяют также по способу и характеру поддержания ритма работы:

с жестким (регламентированным) ритмом, который характерен для непрерывно-поточного производства; жесткость ритма поддерживается принудительным распределением изделий по рабочим местам с помощью транспортирующих устройств;

со свободным ритмом; линии не имеют технических средств, строго регламентирующих ритм работы. Эти линии применяют при любых формах потока, соблюдение ритма в этом случае возлагается непосредственно на работников, обслуживающих данную линию.

В зависимости от количества одновременно обрабатываемых объектов одного наименования линии делят на однопоточные и многопоточные. В полупроводниковом производстве применяют оба типа линий, так как для них характерно чередование операций с поштучной обработкой изделий на одних операциях, с обработкой изделий партиями на других операциях.

Автоматические линии проектируются на базе полуавтоматического, автоматического оборудования, промышленных роботов. Автоматизированное и автоматическое оборудование бывает: дискретного, непрерывного и квазинепрерывного действия.

Автоматическая линия (АЛ) представляет собой систему автоматических станков и агрегатов, которые устанавливаются в технологической последовательности и объединяются общими системами транспортирования заготовок, удаления отходов и управления. По характеру транспортной связи оборудования АЛ подразделяются на две группы:

жесткие (синхронные) и гибкие (несинхронные). Жесткие линии характеризуются тем, что на всех рабочих позициях детали обрабатываются одновременно, а после окончания операций перемещаются транспортером на соседние позиции.

Гибкие линии состоят из независимо (по времени) работающих станков с гибкой транспортной связью.

В зависимости от способа перемещения обрабатываемых деталей АЛ подразделяются на спутниковые и беспутниковые

Спутниковые АЛ — это линии, в которых детали базируются, обрабатываются в течение всего технологического процесса в приспособлениях, называемых спутниками. Применение таких приспособлений позволяет точно базировать детали сложной формы, не имеющие базовых поверхностей, расширяет номенклатуру деталей, однако увеличивает затраты на обслуживание линий.

Беспутниковые АЛ в свою очередь подразделяются на прямоточные, поточные, бункерные.

В прямоточных линиях (рис. 17.2, а) детали с помощью транспортера перемещаются от одного станка к другому на расстояние L , равное расстоянию между рабочими зонами станков, а затем подаются в зону обработки. В поточных линиях (рис.17.2,б) заготовки передаются на расстояние d , равное размерам самой заготовки. Бункерные линии (рис.17.2, в) снабжаются бункерами, откуда заготовки непрерывно подаются к станкам. Они применяются для обработки деталей небольшой массы и размеров, квазинепрерывного действия (рис. 17.2,г) – обработка и сборка производятся в процессе основного и вспомогательного движения.

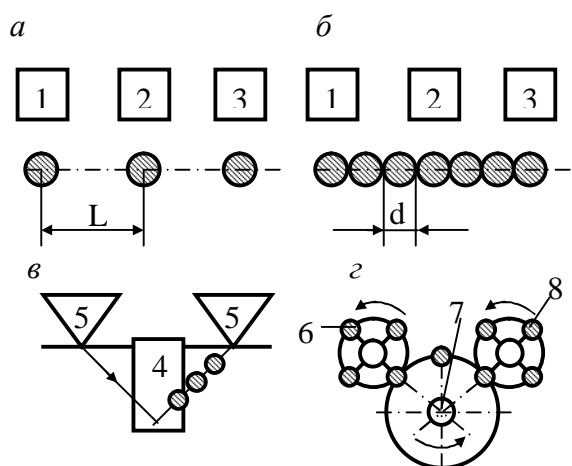


Рисунок 17.2 - Схемы автоматических линий:

1-4 станки; 5 – бункеры; 6 – заготовки; 7 – рабочий ротор;
8 – транспортный ротор

Транспортные системы автоматических линий подразделяются на жесткие и гибкие.

Жесткое транспортное устройство линий спутникового вида состоит из межстаночного транспортера, перемещающего от станка к станку детали в спутниках, возвратного транспортера и поворотного устройства для изменения ориентации спутников

Гибкость межагрегатных транспортных связей может быть достигнута с помощью накопителей деталей, расположенных между отдельными участками, обработкой деталей в параллельных потоках. Примером гибкой линии, состоящей из участков 1 и 3 и накопителя 2 между ними, является линия с проходным транспортером-накопителем (рис. 17.3)

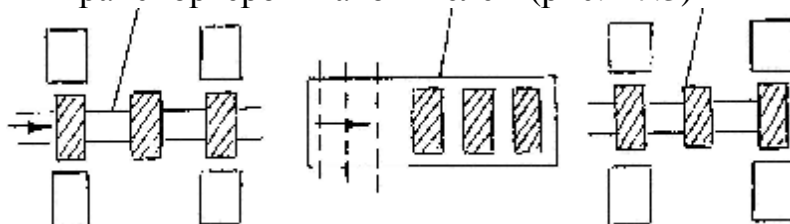


Рисунок 17.3. Схема гибкой транспортной системы с накопителем

Механизация и автоматизация процессов сборки РСИ осуществляется путем применения поточных линий:

механизированных, в которых большая часть операций производственного процесса выполняется с применением механизированного инструмента (пневматического, электрифицированного и др.), а процессы перемещения собираемых изделий механизированы путем применения конвейера без автоматического адресования;

автоматизированных, в которых большая часть операций выполняется с применением полуавтоматического и автоматического оборудования, а процессы перемещения изделий автоматизированы путем применения конвейера с автоматическим адресованием.

В зависимости от номенклатуры закрепленных за линией изделий поточные линии могут быть однопредметными и многопредметными. За однопредметной линией закреплена сборка изделия одного наименования, за многопредметной — изделий разных наименований, сходных по конструктивно-технологическим признакам. Технологической основой создания многопредметных линий является применение групповых или типовых ТП, позволяющих приблизить организацию серийного производства к условиям массового производства.

Робототехнические комплексы

Переход от автоматизированных поточных линий к автоматическим производственным системам, работающим с минимальным участием человека, осуществляется путем использования роботов. Промышленные роботы дают возможность автоматизировать не только основные, но и вспомогательные операции, обеспечить быструю переналадку

автоматический линий, что является предпосылками создания гибкого автоматического производства.

В настоящее время под роботом понимают автоматический манипулятор с программным управлением. В зависимости от участия человека в процессе управления роботами их подразделяют на биотехнические, автономные, полуавтоматические и автоматические. К биотехническим относятся дистанционно управляемые роботы, копирующие движения человека и имеющие средства обратной связи. Автономный робот может длительно работать без участия человека. Полуавтоматический робот характеризуется сочетанием ручного и автоматического управления. Он снабжен устройством управления для вмешательства человека в процесс автономного функционирования путем сообщения дополнительной информации или последовательности действий.

Деление роботов на поколения.

Роботы первого поколения имеют жесткую (как правило цикловую) программу действий и элементарную обратную связь с окружающей средой или не имеют ее.

Роботы второго поколения (адаптивные роботы) обладают координацией движений с восприятием. Они пригодны для малоквалифицированного труда при изготовлении изделий. Программа работы робота требует для реализации движений управляющей ЭВМ и программного обеспечения для обработки сенсорной информации и выработки управляющих воздействий.

Роботы третьего поколения обладают способностью к обучению и адаптации в процессе решения производственных задач и способны вести диалог с человеком, формировать модель внешней среды, распознавать и анализировать сложные ситуации.

Структурная схема промышленного робота (ПР) включает ряд систем устройства (рисунок 17.4): механическую, приводов, управления, связи с оператором, информационную, а также операционное устройство.

Основные технические характеристики роботов.

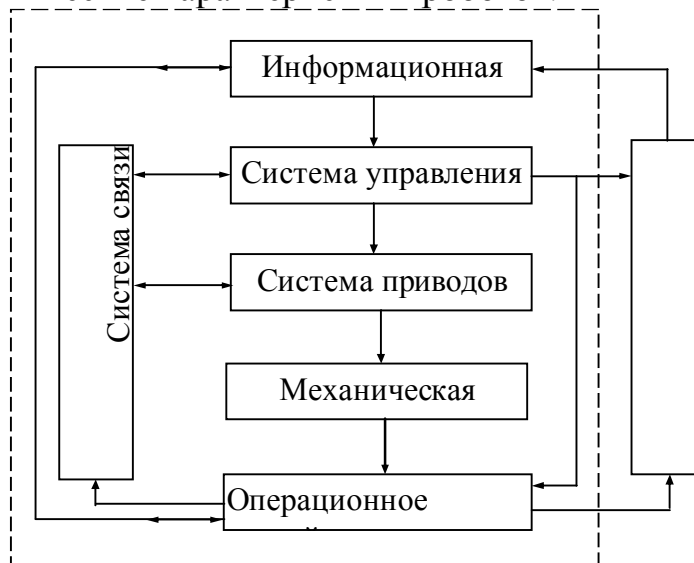


Рисунок 17.4 - Структурная схема ПР

Число степеней подвижности — сумма возможных координационных движений объекта манипулирования относительно опорной системы. Простые роботы-манипуляторы имеют две степени подвижности, сложные — шесть.

Грузоподъемность руки — наибольшая масса груза, перемещаемого при заданных условиях, например скорости и т. д. ПР подразделяются на сверхлегкие (до 1 кг), легкие (1—10 кг), средние (10—200 кг), тяжелые (200—1000 кг).

Рабочая зона — пространство, в котором при работе может находиться рука манипулятора. ПР с малой точностью позиционирования и погрешностью более 1,0 мм способны выполнять транспортные операции, операции окраски, конструкционной сварки. Средняя точность позиционирования 0,1—1,0 мм при скоростях перемещений 0,5—1,0 м/с в основном удовлетворяет требованиям, предъявляемым к обслуживанию различных видов технологического оборудования. ПР с высокой точностью позиционирования (менее 0,1 мм) используют для выполнения сборочных работ.

Скорость перемещения конечного звена манипулятора, которая определяет быстродействие. Малое быстродействие при скорости перемещения до 0,5 м/с характерно для гидравлических ПР средней и большой грузоподъемности. Среднее быстродействие (до 1,0 м/с) соответствует средней скорости движения руки человека и основной массе ПР, используемых для автоматизации производственных процессов. Высокое быстродействие (более 1,0 м/с) используется для ограниченного типоразмера роботов вследствие значительных механических трудностей их создания и эксплуатации.

Системы управления ПР подразделяются на цикловые, позиционные, контурные и комбинированные. При цикловом управлении программируются последовательность движений и интервалы времени между циклами. Информация о положении исполнительных механизмов ПР задается для крайних положений рабочих органов по каждой из координат. Позиционное управление позволяет программировать независимые перемещения по осям координат в произвольные точки рабочей зоны манипулятора. Здесь движение каждой степени подвижности осуществляется в виде конечной последовательности позиций, заданных программой, с дискретной отработкой движений. При контурном управлении рабочие органы манипулятора перемещаются по заданной программой траектории в пределах рабочей зоны. Комбинированное управление объединяет возможности позиционного и контурного управления.

Характеристики некоторых промышленных роботов приведены в табл. 17.1

Таблица 17.1 - Техническая характеристика промышленных роботов

Параметр	Тип робота					
	ПМР-0.5-154-КПВ	ПР5-2П	РС-4	РС-6	"Гном-52"	РМ-01
Число степеней подвижности	4	3	5	4	3	6
Горизонтальное перемещение, мм	154	150	255	240	250—180	864
Средняя скорость горизонтального перемещения, мм/с	400	200	400	400	500	500
Вертикальное перемещение, мм	50	100	48	48	50	432
Средняя скорость, мм/с	100	200	100	100	100	500
Точность позиционирования, мм	±0,29	±0,1	±0,05	±0,05	±0,25	±0,1
Система управления	Позиционная	Цикловая	Цикловая	Позиционная	Цикловая	МикроЭВМ

Гибкие автоматизированные производства

Традиционные жесткие автоматические линии перестали соответствовать требованиям современного развития техники и сдерживали создание новых изделий. Поэтому в современных условиях гибкость производства приобретает особую значимость.

Этап гибкой автоматизации, начавшийся в начале 80-х годов, характеризовался появлением ГПС первого поколения. В основе их действия лежали принципы программного управления оборудованием в масштабе участка или цеха и последовательной технологии обработки изделий (рис. 17.5).

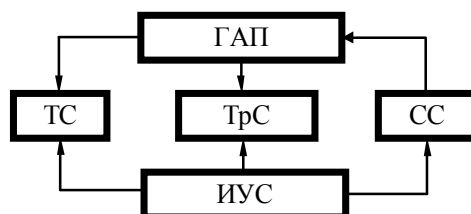


Рисунок 17.5 - Структура ГАП

В состав технологической системы (ТС) входят модули или технологические ячейки (рис. 17.6): автоматическая обрабатывающая ячейка (АОЯ), включающая переналаживаемое технологическое оборудование, робот-манипулятор и управляющую микроЭВМ; автоматизированная

контрольно-измерительная ячейка (АКИЯ), включающая автоматизированный пульт контроля и управляющую микроЭВМ.

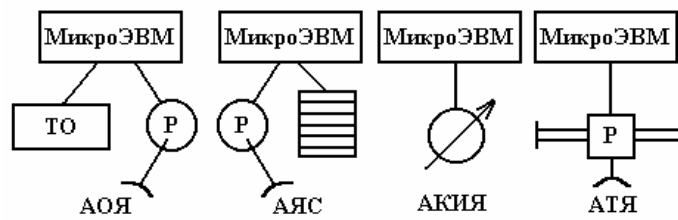


Рисунок 17.6 - Основные ячейки ГАП

Транспортная система (ТрС) наряду с традиционными транспортными средствами (подвесные конвейеры) использует автоматические транспортные ячейки (АТЯ), включающие транспортный робот и управляющую микроЭВМ.

Складская подсистема (СС) обеспечивает прием, учет, хранение и выдачу заготовок, инструмента и готовой продукции. Она включает в основном автоматизированные ячейки склада (АЯС).

Информационно-управляющая система (ИУС) служит для хранения информации, необходимой для оперативного управления производством

АТО состоит из ряда типовых элементов (рис. 17.7). В число типовых элементов АТО входят: специализированные устройства (автоматические загрузочные — АЗУ, транспортные — ТУ, питатели — П, накопители — Н) и технические средства АСУ (датчики, видеоконтрольные устройства и др.).

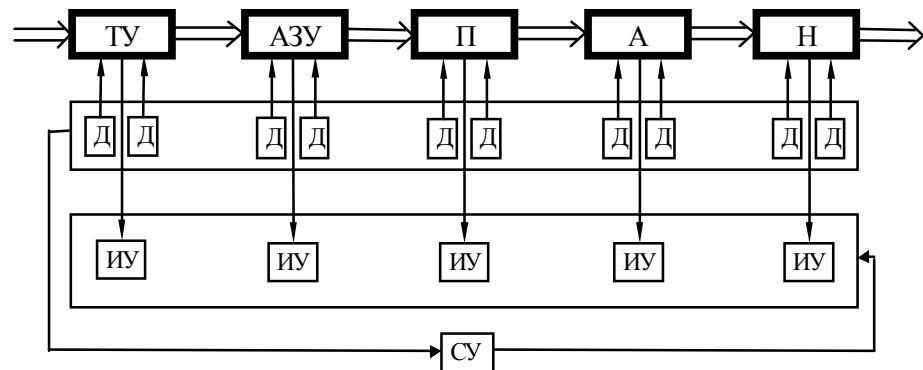


Рисунок 17.7 - Структура АТО

Гибкая производственная система (ГПС) (ГОСТ 26228—85) представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, РТК, ГПМ, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени. ГПС обладает возможностью автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. Основными частями ГПС являются ГПМ и РТК.

ГПМ представляет собой единицу технологического оборудования с программным управлением для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик,

автономно функционирующую, автоматически осуществляющую все функции, связанные с изготовлением изделий, и имеющую возможность встраивания в ГПС.

Под РТК понимается совокупность единицы технологического оборудования, ПР и средств оснащения, автономно функционирующих и осуществляющих многократные циклы.

К преимуществам ГПС относятся: резкое увеличение производительности труда в условиях мелкосерийного производства, высвобождение рабочих от малоквалифицированного и монотонного труда; сокращение времени производственного цикла в несколько раз; повышение качества продукции за счет устранения ошибок и нарушений технологических режимов, снижение объема незавершенного производства.