

2.4. Вакуумные системы.

Вакуум (*vacuum* — пустота) — пространство, свободное от вещества. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, содержащую газ при давлениях значительно ниже атмосферного.

Давление — физическая величина, равная силе F , действующей на единицу площади поверхности S перпендикулярно этой поверхности. В данной точке давление определяется как отношение нормальной составляющей силы, действующей на малый элемент

поверхности, к его площади: $P = \frac{dF_n}{dS}$.

Единицы измерения давления

	Паскаль (Pa, Па)	Бар (bar, бар)	Техническая атмосфера (at, ат)	Физическая атмосфера (atm, атм)	Миллиметр ртутного столба (мм рт.ст.,mmHg, Торр, торр)	Метр водяного столба (м вод. ст.,m H₂O)	Фунт-сила на кв. дюйм (psi)
1 Па	1 Н/м ²	10 ⁻⁵	10,197·10 ⁻⁶	9,8692·10 ⁻⁶	7,5006·10 ⁻³	1,0197·10 ⁻⁴	145,04·10 ⁻⁶
1 бар	10 ⁵	1·10 ⁶ дин/см ²	1,0197	0,98692	750,06	10,197	14,504
1 ат	98066,5	0,980665	1 кгс/см ²	0,96784	735,56	10	14,223
1 атм	101325	1,01325	1,033	1 атм	760	10,33	14,696
1 мм рт.ст.	133,322	1,3332·10 ⁻³	1,3595·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	1 мм рт.ст.	13,595·10 ⁻³	19,337·10 ⁻³
1 м вод. ст.	9806,65	9,80665·10 ⁻²	0,1	0,096784	73,556	1 м вод. ст.	1,4223
1 psi	6894,76	68,948·10 ⁻³	70,307·10 ⁻³	68,046·10 ⁻³	51,715	0,70307	1 lbf/in ²

Приборы измерения вакуума (манометр, вакууметр)

Вакуумметр – манометр для измерения давления разреженного газа. **Манометр** - измерительный прибор или измерительная установка для измерения давления или разности давлений.

Абсолютный вакуумметр – вакуумметр, чувствительность которого одинакова для всех газов и может быть рассчитана по измеряемым физическим величинам.

Дифференциальный вакуумметр – вакуумметр для измерения разности давлений, существующих одновременно по обе стороны разделительного чувствительного элемента.

Вакуумметр полного давления – вакуумметр для измерения суммарного давления, оказываемого всеми компонентами газовой смеси.

Жидкостной вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на уравнивании измеряемого давления или разности давлений давлением столба жидкости.

Компрессионный вакуумметр – жидкостной вакуумметр, в котором для измерения давления разреженного газа последний подвергают предварительному сжатию.

Деформационный вакуумметр – вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости деформации чувствительного элемента или развиваемой им силы от измеряемого давления.

Мембранный вакуумметр – деформационный вакуумметр, в котором чувствительным элементом является мембрана или мембранная коробка.

Термопарный вакуумметр – тепловой вакуумметр, которым использована зависимость ЭДС термопары от измеряемого давления.

Вакуумметр сопротивления – тепловой вакуумметр, действие которого основано на зависимости электрического сопротивления нагреваемого током элемента от давления газа.

Ионизационный вакуумметр - вакуумметр полного давления, действие которого основано на зависимости ионного тока, образованного в газе в результате ионизации молекул разреженного газа, от давления.



Вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа λ и характерным размером среды d . В зависимости от величины соотношения $\lambda / d = Kn$, называемое коэффициентом Кнудсена различают несколько видов вакуума.

Степени (уровни) вакуума в РФ и русскоязычной традиции	Степени (уровни) вакуума у англосаксов, да и в международной трактовке
<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Низкий вакуум</u> ● $\lambda \ll L_{эф}$ ● $Kn < \text{или} = 5 \cdot 10^{-3}$ ● Давление $10^5 \dots 10^2$ Па ($10^3 \dots 10^0$ мм рт.ст.) ● <u>Средний вакуум</u> ● $\lambda \geq L_{эф}$ ● $5 \cdot 10^{-3} < Kn < 1.5$ ● Давление $10^2 \dots 10^{-1}$ Па ($10^0 \dots 10^{-3}$ мм рт.ст.) ● <u>Высокий вакуум</u> ● $\lambda > L_{эф}$ ● $Kn \geq 1.5$ ● Давление $10^{-1} \dots 10^{-5}$ Па ($10^{-3} \dots 10^{-7}$ мм рт.ст.) ● <u>Сверхвысокий вакуум</u> ● $\lambda \gg L_{эф}$ ● $Kn \gg 1.5$ ● Давление 10^{-5} Па и ниже ($10^{-7} \dots 10^{-11}$ мм рт.ст.) 	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>Low vacuum</u> ● 10^5 Па $> P$(давление)$> 3,3 \cdot 10^3$ Па ● "низкий вакуум" ● <u>Medium vacuum</u> ● $3,3 \cdot 10^3$ Па $\geq P > 10^{-1}$ Па ● "средний вакуум" ● <u>High vacuum</u> ● 10^{-1} Па $\geq P > 10^{-4}$ Па ● "высокий вакуум" ● <u>Very High vacuum</u> ● 10^{-4} Па $\geq P > 10^{-7}$ Па ● "очень высокий вакуум" ● <u>UltraHigh vacuum</u> ● 10^{-7} Па $\geq P > 10^{-10}$ Па ● "сверхвысокий вакуум" ● <u>Extreme UltraHigh vacuum</u> ● 10^{-10} Па $\geq P$ ● "супер сверхвысокий вакуум"

Основным элементом вакуумных систем являются насосы, которые предназначены для создания требуемого вакуума в камерах установок, а также для поддержания рабочего давления при проведении технологического процесса.

В установках для изготовления тонкопленочных структур ИМС применяются **механические форвакуумные и двухроторные насосы, пароструйные диффузионные,** а также **криогенные и турбомолекулярные насосы** и т.д.

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

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

Предельное остаточное давление - это наименьшее давление, которое может быть создано данным насосом при закрытом входном патрубке. При этом подразумевается, что отсутствует натекание в насос извне, со стороны его входного патрубка.

Быстрота действия - это объем газа, откачиваемый в единицу времени при данном давлении на входе в насос (в сечении входного патрубка). Наиболее распространенными, единицами измерения быстроты действий являются м³/ч и л/с.

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

Наибольшее выпускное давление - это наибольшее давление в выходном патрубке, при котором насос еще может выполнять откачку (т. е. при превышении которого откачка прекращается).

Вакуумные насосы можно по параметру - ***Наибольшее давление запуска***, разделить на две группы. К первой относятся насосы, наибольшее давление запуска которых равно **атмосферному** (механические форвакуумные). Во вторую входят насосы, требующие для работы предварительного разрежения, которое обычно создается дополнительным насосом, называемым *насосом предварительного разрежения*, или *предварительного вакуума* (механическим форвакуумным).

Для механических форвакуумных насосов ***Наибольшее выпускное давление*** превышает атмосферное, а для насосов, требующих предварительного разрежения, приблизительно равно наибольшему давлению запуска.

Механические форвакуумные и двухроторные насосы

Насосы этих двух типов имеют одинаковые принципы действия, основанные на перемещении газа вследствие механического движения их рабочих частей, при котором происходит периодическое изменение объема рабочей камеры. *Механические форвакуумные и двухроторные насосы работают в области среднего вакуума, т. е. при давлении от 10^3 до 10^2 Па.*

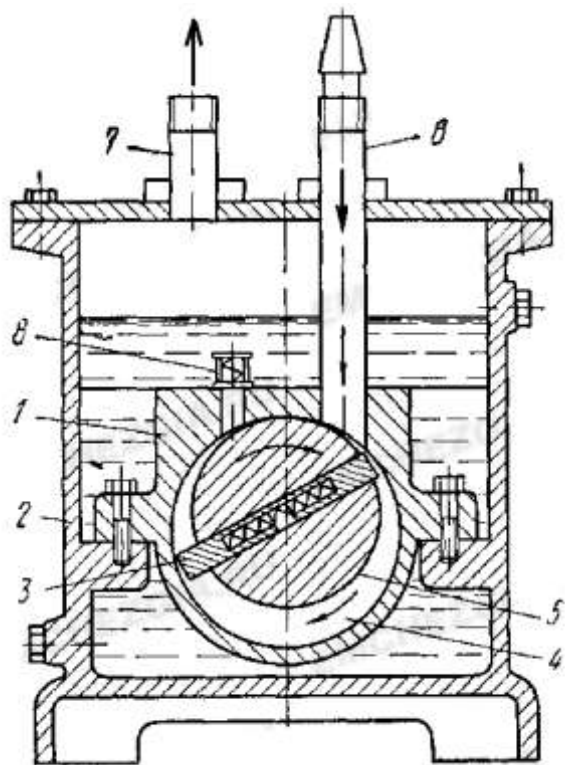


Рисунок. Устройство пластинчато-роторного вакуумного насоса:
1 — камера, 2 — бак с маслом, 3 — пластина, 4 — рабочий объем, 5 — ротор, 6 — впускной патрубок, 7 — выпускной патрубок, 8 — выпускной клапан



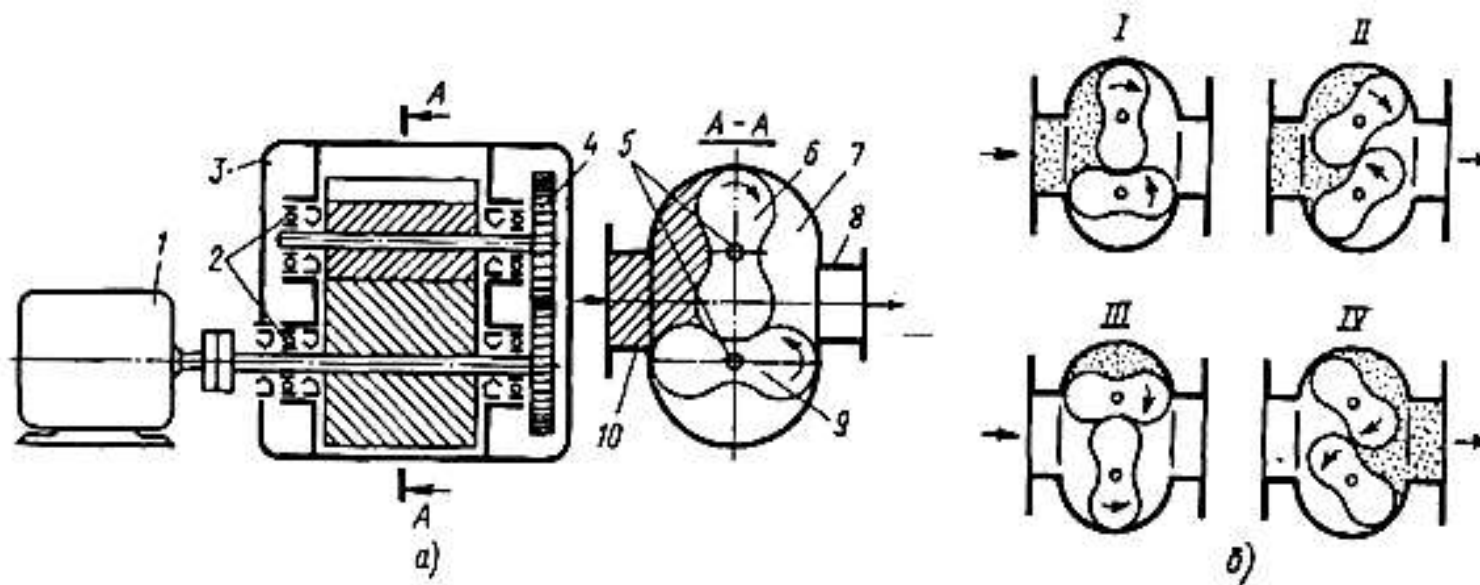


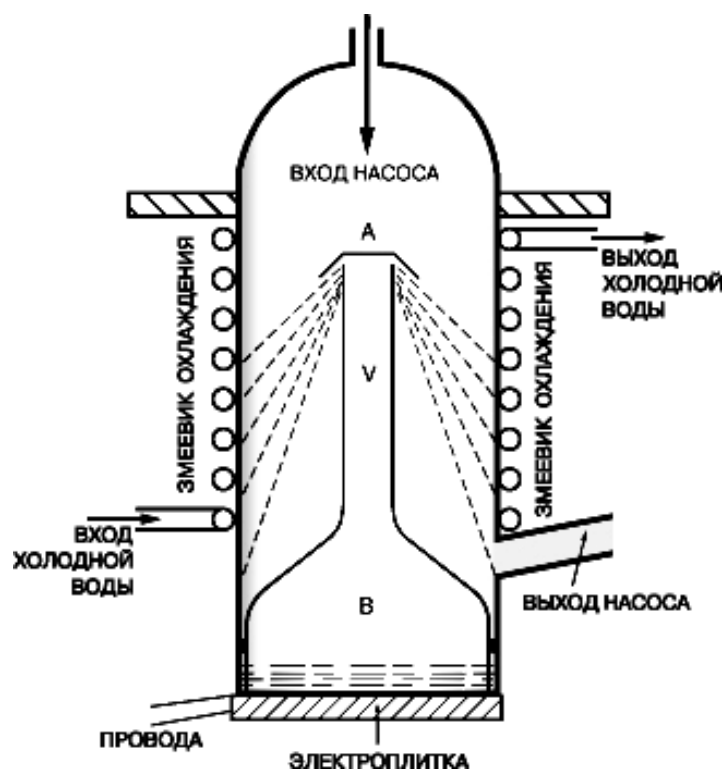
Рисунок. Двухроторный механический насос:

а – устройство, *б* – принцип действия;

1 – электродвигатель, 2 – подшипники, 3 – корпус, 4 – шестеренчатая передача, 5 – вал ротора, 6,9 – роторы, 7 – камера, 8,10 – выпускной и впускной патрубки.

Диффузионные паромасляные насосы

Являются наиболее распространенным высоковакуумным средством откачки и широко применяются в различных областях вакуумной техники. *Паромасляные насосы позволяют создавать вакуум до 10^{-5} Па.*



Турбомолекулярные насосы

Один из видов вакуумных насосов, служащий для создания и поддержки высокого вакуума. Действие турбомолекулярного насоса основано на сообщении молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении откачки вращающимся ротором. Ротор состоит из системы дисков. Вакуум, создаваемый турбомолекулярным насосом, до 10^{-8} Па (10^{-10} мм рт. ст.). Скорость вращения ротора — десятки тысяч оборотов в минуту. Для работы требует применения форвакуумного насоса.

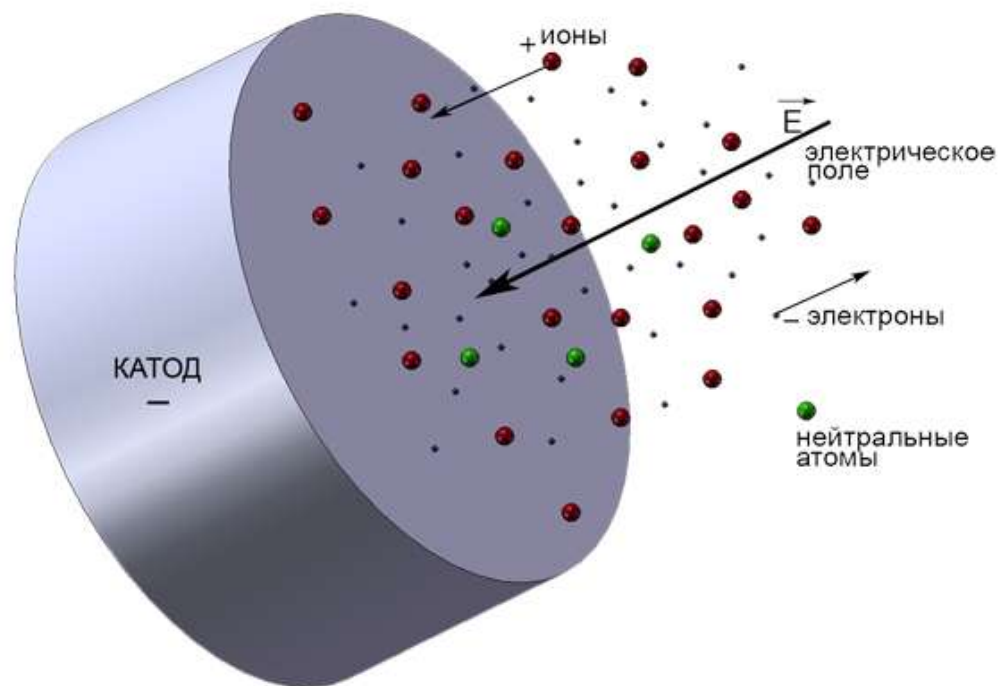


2.5. Нанесение пленок методом катодного и ионно-плазменного распыления.

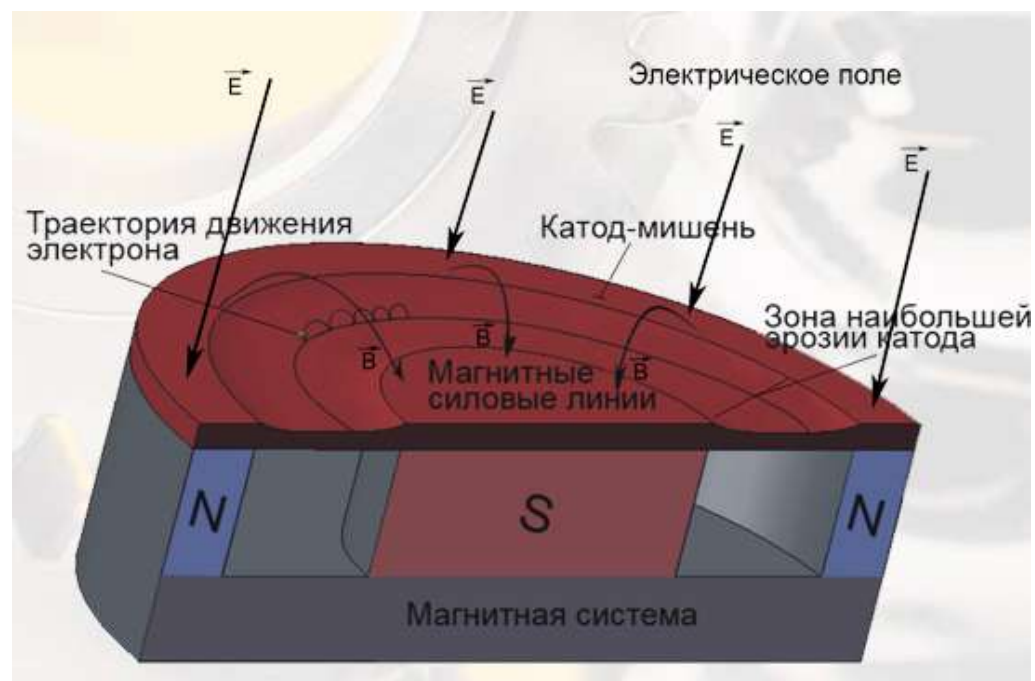
Катодное распыление материалов

Тлеющий разряд. Для образования ионов, используемых при бомбардировке поверхности распыляемой **мишени**, между анодом и катодом в вакуумной камере создают тлеющий разряд. Он характеризуется наличием двух основных областей: небольшой по протяженности *прикатодной*, в которой сосредоточено основное падение потенциала, называемое катодным падением потенциала, и области столба разряда, представляющей собой сильно ионизированный газ-плазму с высокой проводимостью и поэтому с малым падением потенциала. При сближении электродов анода и катода в первую очередь уменьшается протяженность положительного столба разряда. Электроны могут выходить из катода под действием фотоэмиссии. В сильном электрическом поле катодного падения потенциала электроны набирают энергию, определяемую напряженностью электрического поля и их подвижностью в данной области. Возбуждение молекул газа при столкновении с

электронами вызывает появление свечения, а ионизация ведет к образованию положительных ионов газа. Ионы устремляются к мишени, на которую подан отрицательный потенциал относительно плазмы разряда, и расплывают ее. Явление физического распыления обусловлено передачей ускоренным ионом атому мишени энергии, превышающей пороговую энергию смещения, последующим перемещением атома в направлении к поверхности мишени и вылетом из нее. Основным механизмом катодного распыления является процесс передачи импульса либо путем непосредственного столкновения ускоренного иона с атомом мишени, либо путем ряда вторичных столкновений смещенных атомов.



Магнетронный метод представляет собой разновидность метода катодного распыления, при котором у поверхности распыляемого катода (мишени) при помощи скрещенных магнитного и электрического полей формируется слой плазмы, плотность которой на порядки больше, чем в обычных (безмагнитных) системах катодного распыления. Следовательно, значительно возрастают плотность ионного тока на катод и скорость ионного распыления. Для получения соединений к инертному газу добавляют соответствующие реакционные газы (азот, метан, ацетилен).



Вакуумный универсальный пост (ВУП)



2.6. Эпитаксиальные пленки.

Термин «эпитаксия» был введен для обозначения процесса ориентированного наращивания кристаллов на кристаллах.

Эпитаксиальный слой - это монокристаллический материал, осажденный на кристаллическую подложку, сохраняющий морфологию (структуру) этой подложки. В процессе эпитаксиального нарастания образующаяся фаза закономерно продолжает кристаллическую решетку имеющейся фазы с помощью образования переходного эпитаксиального слоя.

Известны три группы процессов эпитаксии: *авто-*, *гетеро-* и *хемоэпитаксия*.

Автоэпитаксия (от греч. «авто» - само) - это процесс, ориентированного нарастания кристаллического вещества, однотипного по структуре с подложкой, отличающегося от нее только содержанием легирующих примесей.

Гетероэпитаксия (от греч. «гетеро» - другой) - это процесс ориентированного нарастания вещества, отличающегося по составу от вещества подложки, происходящий при их кристаллохимическом взаимодействии.

Хемоэпитаксия - это процесс ориентированного нарастания вещества, в результате которого образование новой фазы происходит при химическом взаимодействии вещества подложки с веществом, поступающим из внешней среды. Полученный хемоэпитаксиальный слой отличается по составу как от вещества подложки, так и от вещества, поступающего на ее поверхность.

Существует три основных технологических метода эпитаксии, отличающихся природой физико-химических явлений образования растущего слоя:

- 1) *молекулярно-лучевая эпитаксия из молекулярных пучков в вакууме;*
- 2) *газофазная эпитаксия* с помощью химического взаимодействия вещества в газовой или парогазовой смеси, называемая газовой или химической эпитаксией;
- 3) *жидкофазная эпитаксия* в жидкой фазе путем рекристаллизации из расплава или раствора-расплава.

Эпитаксия из молекулярных пучков в вакууме

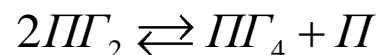
Вещество-источник (монокристаллический кремний или германий) с помощью сфокусированного электронного пучка в высоком вакууме интенсивно испаряется, образуя поток молекулярных частиц, достигающих подложки без промежуточных взаимодействий. Осевшие на поверхность подложки частицы полупроводника под влиянием сил молекулярного взаимодействия образуют правильную структуру, определяемую кристаллической ориентацией полупроводника. Рост эпитаксиального слоя происходит вдоль поверхности, и растущий слой повторяет структуру подложки.

Получаемый слой обладает высоким удельным сопротивлением, так как вероятность попадания посторонних примесей из вакуумной камеры мала, но производительность процесса недостаточна для промышленного производства.

Эпитаксия в газовой фазе с помощью химического взаимодействия

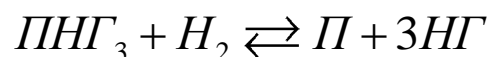
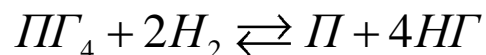
При кристаллизации из газовой фазы с помощью химического взаимодействия атомы полупроводника переносятся в составе химического соединения, которое диссоциирует на подложке, освобождая атомы полупроводника или его молекулы. Химические реакции, приводящие к освобождению атомов полупроводника, можно объединить в четыре группы.

1. Реакции диспропорционирования галоидных соединений:

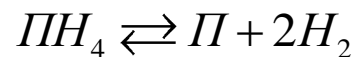


где $П$ - атом полупроводника; $Г$ - атом галоида (хлор, фтор, бром, йод).

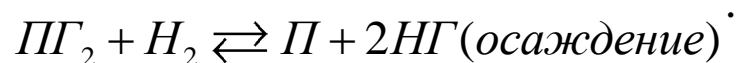
2. Реакции восстановления галоидных соединений водородом:



3. *Пиролиз* (термораспад) - разложение соединений при нагреве:



4. *Транспортные химические реакции* (реакции переноса), идущие в две стадии:



Все эти реакции - обратимые. Направление протекания реакции и скорость осаждения зависят от концентрации исходных веществ и режима процесса.

Эпитаксия в жидкой фазе

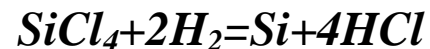
Метод жидкофазной эпитаксии заключается в наращивании монокристаллического слоя полупроводника из расплава или раствора-расплава, насыщенного полупроводниковым материалом. Полупроводник эпитаксиально кристаллизуется на поверхности подложки, погружаемой в расплав, при его охлаждении.

Перспективным является процесс *пар - жидкость - твердое тело*, сочетающий методы газовой и жидкостной эпитаксии. На поверхность полупроводниковой подложки наносят тонкий слой металла, образующего жидкую фазу эвтектического состава, что позволяет использовать низкие температуры эпитаксии. Атомы полупроводника осаждаются из газовой фазы и диффундируют через слой жидкости к границе с подложкой, где происходит их кристаллизация. Так как толщина слоя расплава не превышает 1 мкм, то скорость роста эпитаксиального слоя практически не зависит от времени диффузии атомов в расплаве.

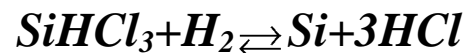
Технологические особенности эпитаксии Si

Среди наиболее распространенных методов наращивания эпитаксиальных слоев германия и кремния основными являются восстановление их тетрахлоридов водородом и термическое разложение моносилана SiH_4 и моногермана GeH_4 .

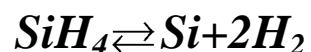
Хлоридный метод эпитаксии кремния. Его широкое распространение обусловлено сравнительной простотой и доступностью исходных материалов. Пары тетрахлорида кремния и водород подаются в реактор, где протекает основная реакция восстановления кремния



Вместо тетрахлорида иногда используют трихлорсилан SiHCl_3 , восстановление которого протекает согласно реакции



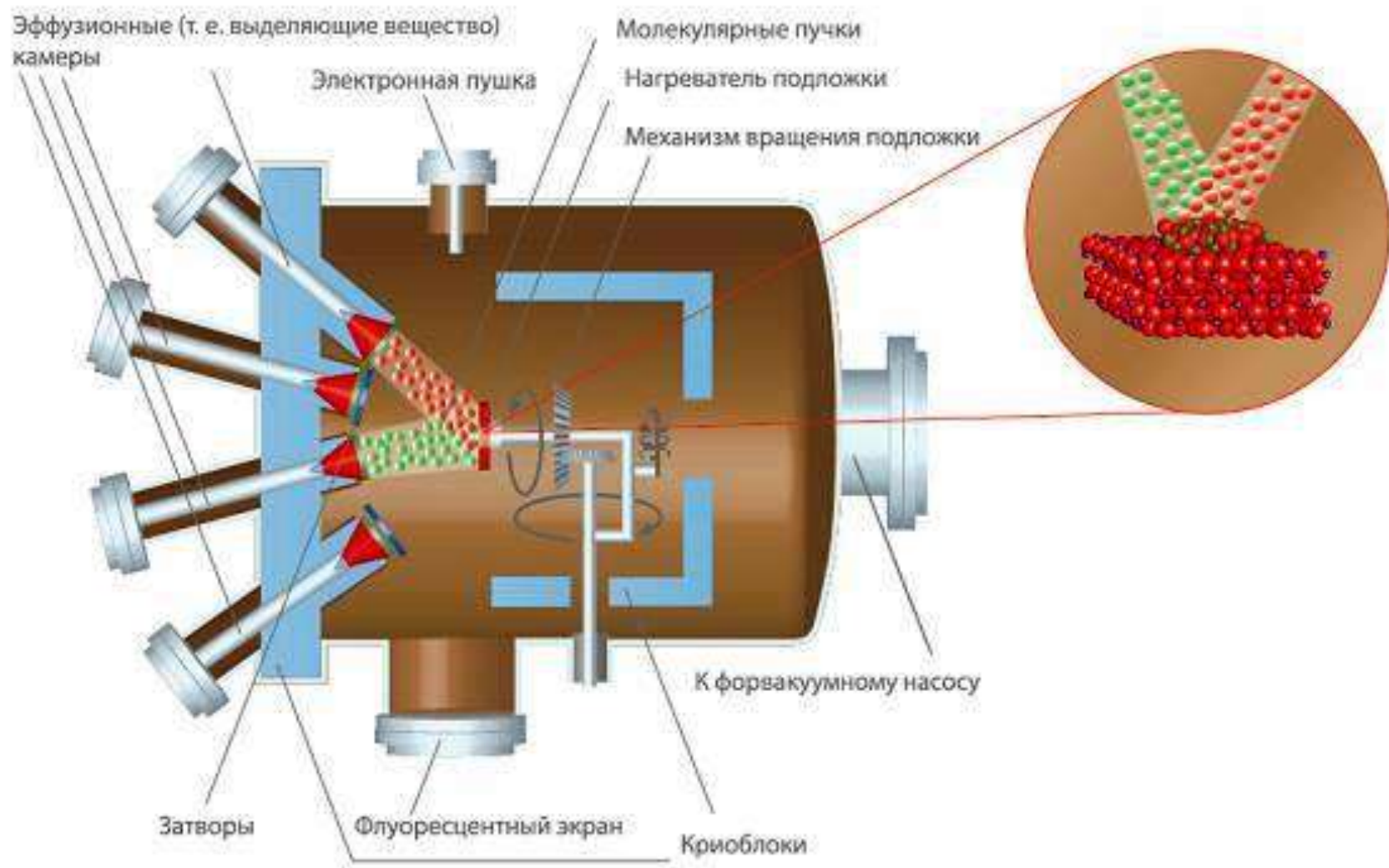
Гидридный метод эпитаксии кремния. При эпитаксии хлоридным методом температура подложек составляет 1200° С. В результате происходит диффузия примесей из сильно легированной пластины - в слаболегированный растущий эпитаксиальный слой. Это явление называют *автолегированием*. Автолегирование изменяет концентрацию примесей в эпитаксиальном слое, распределение примесей на границе слоя - подложка. Проблема ограничения автолегирования решается путем использования гидридного метода эпитаксии, позволяющего снизить температуру процесса. Гидридный метод состоит в пиролизе моносилана, поэтому его иногда называют силановым методом. Уравнение реакции термораспада моносилана имеет вид



Освобождающийся кремний осаждается на подложках, температура которых может быть снижена до 1000°С. Это практически, предотвращает диффузию примесей из подложки и способствует росту слоя с равномерным распределением легирующей примеси по толщине.

Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) или молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)

Эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования. В установках МПЭ имеется возможность исследовать качество плёнок «in situ» (то есть прямо в ростовой камере во время роста). Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарногладкой поверхностью.



Установки МЛЭ.

