

**Д. М. Никулин, В. В. Чесноков**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ВАКУУМЕ**

**Новосибирск  
СГУГиТ  
2016**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ»  
(СГУГиТ)

Д. М. Никулин, В. В. Чесноков

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ**

Утверждено редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся  
по направлениям подготовки бакалавров  
21.03.01 «Стандартизация и метрология», 12.03.01 «Приборостроение»

Новосибирск  
СГУГиТ  
2016

УДК 533.5  
Н651

Рецензенты: кандидат физико-математических наук, доцент НГТУ *А. В. Баранов*  
кандидат технических наук, доцент СГУГиТ *К. Я. Аубакиров*

**Никулин, Д. М.**

Н651        Физические процессы в вакууме [Текст] : учеб. пособие /  
Д. М. Никулин, В. В. Чесноков. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 96 с.  
ISBN 978-5-87693-999-9

Учебное пособие подготовлено кандидатом технических наук, доцентом Д. М. Никулиным и доктором технических наук, профессором В. В. Чесноковым на кафедре физики СГУГиТ.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов СГУГиТ всех форм обучения по направлениям подготовки бакалавров 21.03.01 «Стандартизация и метрология» и 12.03.01 «Приборостроение». Учебное пособие содержит необходимый объем знаний для понимания физики вакуума и вакуумной техники. В конце каждого раздела содержатся контрольные вопросы для самоконтроля знаний студентов.

Пособие рекомендовано к изданию Ученым советом Института оптики и оптических технологий СГУГиТ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ.

УДК 533.5

ISBN 978-5-87693-999-9

© СГУГиТ, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	6
<b>1. Физика вакуума</b> .....	7
1.1. Основные термины и определения .....	7
1.1.1. Понятие вакуума и давления .....	7
1.1.2. Общие понятия .....	9
1.2. Молекулярно-кинетическая теория газов .....	11
1.2.1. Давление в вакууме .....	11
1.2.2. Кинетическая энергия молекул .....	13
1.2.3. Уравнение состояния идеального газа .....	14
1.2.4. Скорости теплового движения молекул газа .....	15
1.2.5. Число молекул, ударяющихся о поверхность .....	16
1.2.6. Скорость испарения и давление пара .....	17
1.2.7. Соотношение между коэффициентами вязкости, сред- ней длиной свободного пробега и диаметром молекул .....	18
1.2.8. Теплопроводность газов .....	21
1.2.9. Теория диффузии газов .....	23
1.2.10. Влияние давления газа на скорость испарения металла .....	24
Вопросы для самоконтроля .....	24
<b>2. Течение газов через трубы и отверстия</b> .....	25
2.1. Понятие вязкостного и молекулярного течения .....	25
2.2. Ламинарное и турбулентное течение, число Рейнольдса .....	26
2.3. Пропускная способность и сопротивление трубопроводов .....	27
2.4. Вязкостное течение .....	28
2.5. Молекулярное течение .....	29
2.5.1. Молекулярное течение через длинные трубы и каналы .....	29
2.5.2. Молекулярное течение через отверстия и короткие трубы .....	30
2.6. Течение в промежуточном режиме .....	31



6.2. Влияние сорбционных процессов при откачке вакуумных установок .....	66
6.3. Влияние поверхностных реакций при термическом обезгаживании вакуумных объемов .....	67
6.4. Влияние обратимости сорбционных процессов .....	67
Вопросы для самоконтроля .....	68
<b>7. Технологии тонкопленочных слоев .....</b>	<b>69</b>
7.1. Газофазные процессы осаждения слоев .....	69
7.2. Термическое испарение в вакууме .....	71
7.2.1. Испарение вещества из точечного источника .....	74
7.2.2. Испарение из поверхностного испарителя .....	75
7.2.3. Выбор способа испарения .....	78
7.2.4. Электронно-лучевые испарители .....	79
7.2.5. Импульсные лазерные испарители .....	80
7.3. Плазменные методы получения тонких пленок .....	80
7.3.1. Общие сведения о тлеющем разряде .....	80
7.3.2. Получение пленок ионно-плазменным распылением .....	85
7.3.3. Магнетронное нанесение пленок .....	86
7.4. Плазмохимическое получение пленок .....	88
7.4.1. Механизм плазмохимического осаждения пленок .....	88
7.4.2. Осаждение пленок металлов .....	89
7.4.3. Осаждение неорганических диэлектрических пленок .....	89
7.4.4. Осаждение тонких полимерных пленок .....	93
Вопросы для самоконтроля .....	94
<b>Список рекомендуемой литературы .....</b>	<b>95</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие практически всех отраслей промышленности связано с интенсивным использованием вакуумной техники для выполнения технологических процессов или проведения физико-технических экспериментов и испытаний. Для получения вакуума нужной степени применяются вакуумные насосы различных типов.

Научный этап развития вакуумной техники начинается с 1643 г., когда в Италии Э. Торичелли измерил атмосферное давление. В 1672 г. в Германии О. Герике изобрел механический поршневой насос с водяным уплотнением, что дало возможность проведения многочисленных исследований свойств разреженного газа. Изучалось влияние вакуума на живые организмы. Опыты с электрическим разрядом в вакууме привели к открытию электрона и рентгеновского излучения. Теплоизолирующие свойства вакуума послужили толчком для развития криогенной техники.

Успешное изучение свойств вакуума обеспечило возможность его широкого технологического применения. Оно началось с изобретения в 1873 г. русским ученым А. Н. Лодыгиным первого электровакуумного прибора – лампы накаливания с угольным электродом – и открытием американским ученым и изобретателем Т. Эдисоном в 1883 г. термоэлектронной эмиссии. В свою очередь, расширение практического применения вакуумной техники сопровождалось быстрым развитием методов получения и измерения вакуума. Появились компрессионный (Г. Мак-Леод, 1874), тепловой (М. Пирани, 1909), ионизационный (О. Бакли, 1916) вакуумметры, исследуются фундаментальные свойства газов при низких давлениях (М. Кнудсен, М. Смолуховский, И. Ленгмюр, С. Дешман).

В настоящее время в России и за рубежом продолжают работы по совершенствованию систем получения и измерения вакуума, разрабатываются новые расчетные методики.

# 1. ФИЗИКА ВАКУУМА

## 1.1. Основные термины и определения

### 1.1.1. Понятие вакуума и давления

*Вакуумная техника* – прикладная наука, рассматривающая проблемы изучения и поддержания вакуума, а также вопросы разработки конструирования и применения вакуумных систем и их элементов.

*Вакуумом* называют состояние газа при давлении значительно ниже атмосферного.

Давление  $P$  – величина, равная отношению силы  $F$ , действующий на элемент поверхности нормально к ней, к площади  $S$  этого элемента:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{N}{\text{м}^2} = (\text{Па}).$$

Единицы давления, допускаемые к применению, и их соотношение с единицей СИ (Па):

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}.$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}.$$

$$760 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па}.$$

Количественной характеристикой вакуума служит абсолютное давление (разница между атмосферным и вакуумным):

$$P_{\text{аб}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}}.$$

Интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме зависит от соотношения между числом столкновения молекул газа со стенками ограничивающего сосуда и числом взаимных столкновений молекул, характеризуется отношением средней длины свободного пути

молекул к характерному размеру сосуда. Это число называется числом Кнудсена:

$$Kn = L_a / l,$$

где  $L_a$  – средняя длина свободного пути молекулы;  $l$  – характерный размер сосуда.

С использованием числа Кнудсена идет деление по степеням вакуума. Степень вакуума определяется равновесным давлением, которое устанавливается в откачиваемом объеме под действием противоположных процессов, откачки газа насосом и поступления газа в объем за счет натекания через неплотности диффузионных и технологических газовыделений и проницаемости газа через стенки сосуда.

Вакуум бывает: низкий, средний, высокий, сверхвысокий.

*Низкий вакуум* характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул значительно меньше характерного линейного размера сосуда ( $L_a \leq l$ ). Это область давлений от  $10^5$  до 100 Па.

*Средний вакуум* характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул приблизительно равна характерному линейному размеру сосуда ( $L_a \approx l$ ). Это область давлений 100 до 0,1 Па.

*Высокий вакуум* характеризуется давлением газа, при котором средняя длина пробега молекул значительно больше характерного линейного размера сосуда ( $L_a \geq l$ ). Это область давлений от 0,1 до  $10^{-5}$  Па.

*Сверхвысокий вакуум* характеризуется давлением газа, при котором не происходит заметного изменения свойств поверхности, первоначально свободной от абсорбирующего газа за время, существующее для рабочего процесса. Это область давлений от  $10^{-5}$  Па и ниже.

Низкий и средний вакуум используются в осветительных приборах. Высокий – используется в приемно-усилительных генераторных лампах.

Сверхвысокий вакуум применяется в металлургии (плавка и переплавка в вакууме) для получения различных сплавов, для получения сверхчистых веществ, полупроводников, диэлектриков и т. д.; кристаллизации (искусственные сапфиры); диффузионной сварке (для соедине-

ния деталей из металлов с сильно различающимися температурами плавления).

Химическая промышленность – вакуумные сушильные аппараты, вакуумные фильтры, кристаллизирующие вакуумные аппараты.

Электротехническая промышленность – производство кабелей, электродвигателей с использованием вакуумной пропитки.

Оптическая промышленность – производство зеркал (вакуумное алюминирование), просветленная оптика, производство биноклей, очков и т. д.

Пищевая промышленность – вакуумные упаковки, доильные аппараты, пылесосы.

Транспорт – вакуумные усилители тормозных систем.

Медицина – производство и хранение медикаментов.

Разреженные газы по своим свойствам практически не отличаются от идеальных. (*Идеальный газ* – математическая модель газа, в которой предполагается, что потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией. Между молекулами не действуют силы притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги, а время взаимодействия между молекулами пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями.)

### **1.1.2. Общие понятия**

*Газ* – состояние вещества, при котором движение молекул практически не ограничено межмолекулярными силами и занимает весь объем (под газом в вакуумной технике понимают как химически индивидуальный газ, так и смесь газов).

*Остаточный газ* – газ, оставшийся после откачки в вакуумной системе.

*Предельное остаточное давление* – наименьшее давление, которое может быть достигнуто в определенных условиях конкретными устройствами для откачки.

*Форвакуум* – вакуум, создаваемый насосом более низкого вакуума при последовательной работе нескольких насосов.

*Молекулярная концентрация* – число молекул газа в единице объема.

*Длина свободного пути частицы* – длина пути частицы между двумя последовательными столкновениями с другими частицами.

*Средняя длина свободного пути частиц* – среднее арифметическое значение длин свободного пути частиц.

*Диффузия газа* – движение газа в другой среде под влиянием градиента концентраций.

*Вязкостное течение* – течение газа в канале при условии, когда длина свободного пути молекулы очень мала по сравнению с наименьшим поперечным сечением канала.

*Проводимость* – отношение потока к разности средних давлений в двух сечениях потока при изотермическом равновесии. Сопротивление – величина, обратная проводимости.

*Сорбция* – поглощение газа или пара твердым веществом или жидкостью. Десорбция – обратный процесс. (*Абсорбция* – поглощение газа всем объемом твердого тела. *Адсорбция* – взаимодействие газа только с поверхностью твердого тела с образованием на ней пленки в одну или несколько молекул.)

*Частота столкновений* – отношение числа сталкивающихся с поверхностью молекул в заданный интервал времени к этому интервалу и площади поверхности.

*Скорость прилипания* – число молекул, сорбированных на единице площади поверхности в единицу времени.

*Время удерживания* – среднее время, в течение которого молекулы удерживаются на поверхности в состоянии адсорбции.

*Миграция газа* – движение молекулы газа на поверхности твердого тела.

*Газовыделение* – самопроизвольное выделение газа из материала в вакуум.

*Обезгаживание* – принудительное удаление газа из материала.

*Натекание* – проникновение газа из окружающей среды в откачиваемый сосуд.

## 1.2. Молекулярно-кинетическая теория газов

### 1.2.1. Давление в вакууме

Давление газа на стенку сосуда есть результат ударов молекул о стенку. Одновременно о стенку сосуда ударяется множество молекул, и силы ударов отдельных молекул складываются в постоянную силу, действующую на стенку.

Основой физики вакуума (в газах при низких давлениях) являются следующие постулаты:

1. Газ состоит из отдельных движущихся молекул.
2. Существует постоянное распределение молекул газа по скоростям, т. е. одной и той же скоростью обладает всегда одинаковое число молекул.
3. При движении молекул газа нет преимущественных направлений, пространство газовых молекул изотропно.
4. Температура газа – величина, пропорциональная средней кинетической энергии его молекул.

Будем рассматривать одноатомные газы. Считаем, что соударения молекул со стенками являются идеально упругими, т. е. энергия молекул во время столкновения не меняется.

Пусть молекула массой  $m$  приближается к стенке со скоростью  $v$ . Так как молекула отразится от стенки с той же скоростью, изменение импульса молекулы при ударе равно  $p_{\text{изм}} = \overset{\cdot}{p}_1 - \overset{\cdot}{p}_2 = 2mv$  (рис. 1.1).

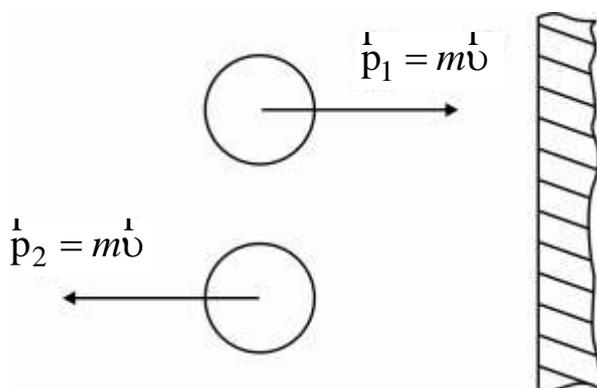


Рис. 1.1. Упругое соударение молекул газа о стенку сосуда

Если за единицу времени о единицу площади стенки ударяется  $N$  ( $1/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ ) молекул, то полный импульс молекул, действующий на эту площадь за единицу времени, равен  $p_{\text{полн}} = 2m\upsilon N$ . Эта величина и является давлением газа на стенку:

$$P = 2m\upsilon N = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}. \quad (1.1)$$

Вычислим значение  $N$ .

Рассмотрим пристеночный объем газа в виде куба, в некоторой точке которого молекулы газа могут двигаться равновероятно в шести различных направлениях (рис. 1.2). Если сторона куба  $l$  численно равна скорости  $\upsilon$  молекул, то за 1 с любая молекула этого куба долетит до стенки, если движется по направлению к ней.

Обозначим через  $n$  – число молекул в единице объема (концентрация молекул газа ( $1/\text{м}^3$ )). На единицу поверхности стенки за 1 с ударится  $\frac{1}{6}n\upsilon = N$  молекул. Подставим последнее выражение в (1.1):

$$P = \frac{1}{3}mn\upsilon^2. \quad (1.2)$$

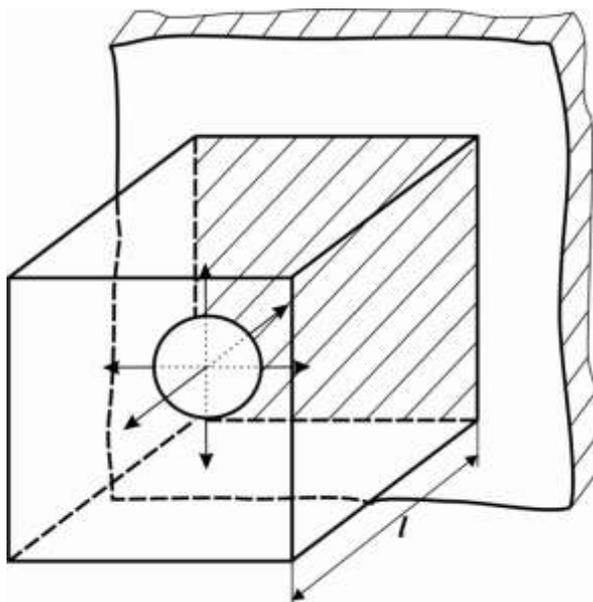


Рис. 1.2. Молекула газа в пристеночном объеме

Так как  $m \cdot n = \rho = \text{кг/м}^3$  – плотность газа, запишем:

$$P = \frac{1}{3} \rho v^2. \quad (1.3)$$

Видим, что давление пропорционально плотности газа (закон Бойля).

Условия равновесия (неизменное количество молекул в объеме), использованные при выводе уравнения (1.3), могут не выполняться, например, в случае конденсирующей поверхности, с которой из-за очень большого времени адсорбции не происходит десорбция молекул газа, и наоборот, тело в космическом пространстве десорбирует молекулы с поверхности, а количеством молекул, ударяющихся об это тело, можно пренебречь. В этих случаях необходимо точно знать соотношение потоков падающих и вылетающих молекул газа.

### 1.2.2. Кинетическая энергия молекул

Определим полную кинетическую энергию молекул, содержащихся в объеме  $V$ , исходя из формулы кинетической энергии молекулы

$$\frac{m_0 v^2}{2} = E_{\text{кин.т}}:$$

$$E_{\text{кин}} = E_{\text{кин.т}} \cdot n \cdot V = \frac{m_0 v^2}{2} \cdot n \cdot V. \quad (1.4)$$

Учитывая (1.2), получим:

$$E_{\text{кин}} = \frac{3}{2} P \cdot V. \quad (1.5)$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа связана с температурой  $T$  газа соотношением:

$$\frac{m_0 v^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.6)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура газа ( $273,15 + t$  (°C)).

Комбинируя (1.4), (1.5) и (1.6), получим:

$$P = nkT.$$

В последнее выражение не входят характеристики молекул газа – их масса  $m_0$  и скорость  $v$ , а только концентрация  $n$ . Если взять одинаковые сосуды с различными газами при равных давлениях, то в них окажутся одинаковые количества молекул:

$$N = n \cdot V,$$

так как концентрации газов в них не зависят от сорта молекул.

Отсюда вывод: равные объемы любых газов при одинаковых давлениях и температурах содержат одинаковое число молекул.

### **1.2.3. Уравнение состояния идеального газа**

Идеальный газ полностью характеризуется тремя физическими величинами – объемом  $V$ , давлением  $P$  и температурой  $T$ . Если взять количество газа, равное по массе молярной массе газа, то указанные физические величины можно записать в виде уравнения:

$$\frac{P \cdot V_M}{T} = \text{const} = R.$$

Получим уравнение состояния идеального газа. Здесь  $V_M$  – объем одного моля газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Для любого количества газа уравнение состояния запишем в виде:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} RT.$$

Здесь  $m$  – масса взятого количества газа;  $M$  – молярная масса газа, выраженная в килограммах на моль.

Количество молекул в молярной массе  $M$  одинаково для любых веществ; это количество называется числом Авогадро  $N_A$ :

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Зная число Авогадро, можно рассчитать массу  $m_0$  одной молекулы:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}.$$

#### 1.2.4. Скорости теплового движения молекул газа

Молекулы газа находятся в состоянии постоянных столкновений, поэтому их скорости различны и постоянно изменяются. Однако усредненное значение скоростей по всему газу постоянно при постоянных условиях. Распределение абсолютных скоростей по их значениям определяется законом Максвелла:

$$F(v) = 4\pi \cdot \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot \exp\left( -\frac{m_0 v^2}{2kT} \right).$$

Вид функции представлен на рис. 1.3.

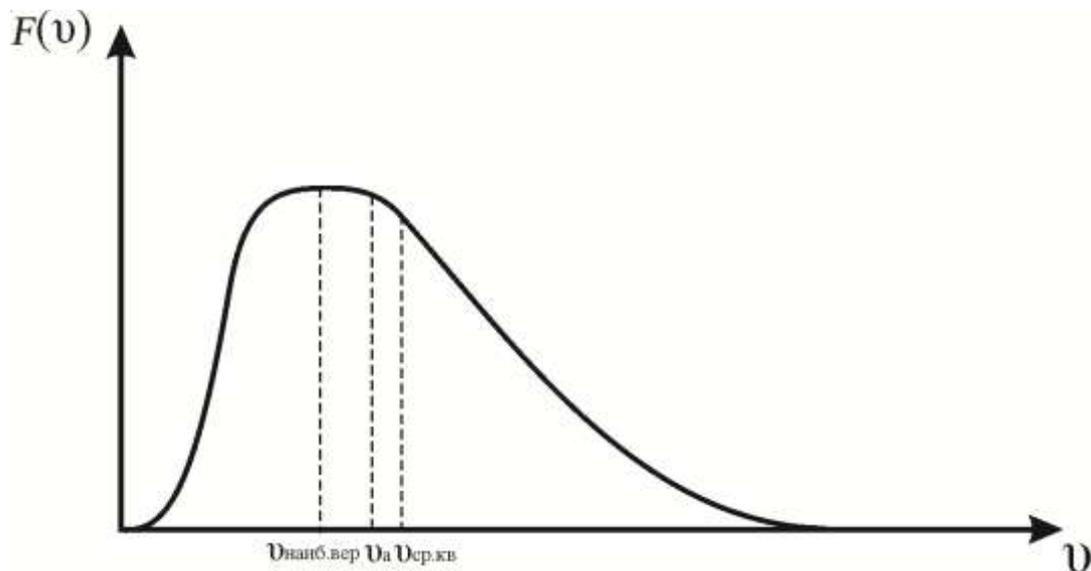


Рис. 1.3. График функции распределения газа по скоростям:  $U_{\text{наиб.вер}}$  – наиболее вероятная скорость;  $U_a$  – среднее арифметическое значение;  $U_{\text{ср.кв}}$  – среднеквадратичная скорость

Скорость, при которой значение функции распределения максимальное, называют наиболее вероятной скоростью:

$$v_{\text{наиб.вер}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}.$$

На практике удобно использовать среднее квадратичное значение скорости молекул:

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

а также среднее арифметическое значение:

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

Здесь  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж / К – постоянная Больцмана. При нахождении среднего квадратичного значения усреднение скоростей произведено по энергиям теплового движения молекул (т. е. молекула, имеющая среднее квадратичное значение скорости, имеет одновременно среднее значение кинетической энергии теплового движения), а при нахождении среднего арифметического значения – по скоростям движения.

Соотношение между скоростями  $v_{\text{наиб.вер}} : v_a : v_{\text{ср.кв}}$  составляет 1 : 1,128 : 1,225.

### **1.2.5. Число молекул, ударяющихся о поверхность**

Если газ в сосуде находится в равновесии, число молекул, ударяющихся об единицу площади стенки сосуда за единицу времени, равно:

$$\nu = \frac{1}{4} n v_a. \quad (1.7)$$

### 1.2.6. Скорость испарения и давление пара

Рассмотрим поверхность испаряющегося металла, когда он находится в равновесии со своим насыщенным паром. Равновесие означает равенство скоростей процессов испарения молекул с поверхности и конденсации молекул из пара на поверхность. Процессы испарения и конденсации противоположны и происходят одновременно и с равными скоростями.

Уменьшим давление пара металла в пространстве над ним. При этом скорость процесса испарения не изменится, она не зависит от присутствия пара. Это означает, что скорость испарения в высоком вакууме такая же, как в присутствии насыщенного пара. Таким образом, мы можем определить скорость испарения через скорость конденсации, через количество молекул, ударяющихся о поверхность (см. формулу (1.7)).

Однако не все молекулы, ударяющиеся о поверхность, на ней конденсируются, а только их доля  $\alpha$ , называемая коэффициентом конденсации. Этот коэффициент равен отношению числа молекул сконденсировавшихся к числу ударившихся за одинаковые промежутки времени. При равновесии:

$$\mu = \alpha \nu, \quad (1.8)$$

где  $\mu$  – скорость испарения молекул с поверхности, т. е. число молекул, улетевших с единицы площади поверхности в единицу времени.

Для металлов и жидкостей  $\alpha \approx 1$ , поэтому, используя (1.7), найдем выражение для скорости испарения:

$$\mu = \nu = \frac{1}{4} n v_a. \quad (1.9)$$

Здесь  $n$  – концентрация молекул пара над испаряющимся веществом, которая зависит от давления пара.

Раньше мы нашли, что

$$n = \frac{P}{kT};$$

$$v_a = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

Подставим эти выражения в (1.9):

$$\mu = \frac{P \cdot N_A}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi R M T}}. \quad (1.10)$$

Найдем скорость испарения массы вещества:

$$G = \mu \cdot m_0 = \mu \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{1}{2} P \sqrt{\frac{2M}{\pi R T}}. \quad (1.11)$$

Последнее выражение дает соотношение между давлением насыщенного пара  $P$  вещества при температуре  $T$  и скоростью его испарения при этой же температуре. Здесь  $m_0$  – масса молекулы.

В табл. 1.1 приведены значения давления насыщенного пара и массовой скорости испарения при разных температурах для некоторых металлов.

Таблица 1.1

Металл	$T$ , К	$G$ , г/(см <sup>2</sup> ·с)	$P$ , Па
Вольфрам $M = 0,184$ кг/моль	3 200	$6,38 \cdot 10^{-6}$	$6,08 \cdot 10^{-2}$
	3 400	$3,47 \cdot 10^{-5}$	0,34
Тантал $M = 0,181$ кг/моль	3 000	$5,79 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$
	3 200	$3,82 \cdot 10^{-5}$	0,377

Используя уравнение (1.11), можно, измеряя убыль веса испаряющегося материала и его поверхность, вычислить давление насыщенного пара при некоторой температуре.

### **1.2.7. Соотношение между коэффициентами вязкости, средней длиной свободного пробега и диаметром молекул**

Газ, текущий через узкую трубку, испытывает при вязкостном режиме течения сопротивление вследствие трения о стенки, и поэтому скорость потока равномерно уменьшается при удалении от центральной оси трубки; у стенок скорость равна нулю. Каждый слой газа, параллельный направлению потока, действует с некоторой тангенциальной силой на соседние слои.

На рис. 1.4. между двумя параллельными пластинками находится газ. При движении газа появляется сила  $F$ , действующая на пластинки  $AB$  и  $CD$  и направленная в сторону движения, – сила вязкости. Внутри газа его плоскопараллельные слои движутся стационарно в горизонтальном направлении, скорость слоев меняется а направлении, перпендикулярном слоям. На каждый слой со стороны соседних слоев действует сила, эта сила направлена параллельно потоку, стремится уменьшить скорость быстрого слоя и увеличить скорость медленного слоя. Явление называется внутренним трением, или вязкостью.

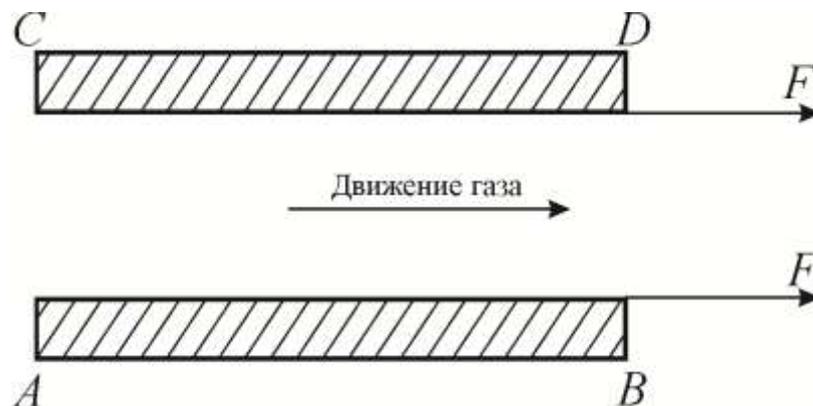


Рис. 1.4. Силы вязкости

Сила трения пропорциональна градиенту скорости в газе в поперечном к потоку направлении.

Коэффициентом вязкости называется тангенциальная сила, действующая на единицу площади внутри жидкости при градиенте скорости, равном единице.

Сила внутреннего трения подчиняется закону Ньютона:

$$f = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (1.12)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $\frac{dv}{dx}$  – градиент скорости. Знак «минус» указывает, что сила трения направлена против скорости.

Вязкость вычисляют по следующей приближенной формуле:

$$\eta \approx 0,5 \cdot \rho \cdot v_a \cdot L_a, \quad (1.13)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $L_a$  – средняя длина свободного пробега молекулы.

Полная сила, действующая на площадь соприкосновения потока с поверхностью пластинки  $S$ , равна:

$$F = f \cdot S = -\eta \frac{dv}{dx} \cdot S. \quad (1.14)$$

Единицей вязкости в системе СИ является Н·с/м<sup>2</sup>, в системе СГС единица вязкости пуаз (пз).

В уравнении (1.13)  $\rho$  увеличивается, а  $L_a$  уменьшается с уменьшением давления газа; произведение этих величин  $\rho \cdot L_a$  не зависит от давления. Можно сделать вывод, что коэффициент вязкости не зависит от давления газа.

Кроме того, учитывая, что скорость  $v_a$  растет с увеличением температуры, находим, что вязкость газа увеличивается с температурой.

Вывод о независимости вязкости от давления справедлив в диапазоне средних значений давления. При малых давлениях, когда длина свободного пробега молекул больше расстояния между стенками сосуда, этот вывод не справедлив.

Можно показать, что длина свободного пробега зависит от диаметра молекул в соответствии с выражением:

$$L_a = \frac{1}{2^{1/2} \pi n \delta^2}, \quad (1.15)$$

где  $\delta$  – диаметр молекулы.

Поэтому и вязкость газа зависит от диаметра молекул:

$$\eta = \frac{0,5 \cdot \rho \cdot v_a}{2^{1/2} \pi \cdot n \cdot \delta^2}. \quad (1.16)$$

Экспериментально определив вязкость, из (1.13) можно найти численные соотношения для длины свободного пробега:

$$L_a = \frac{\eta}{0,5 \cdot \rho \cdot v_a} = \frac{\eta}{P} \left( \frac{\pi RT}{2M} \right)^{1/2}. \quad (1.17)$$

Используя формулы (1.17) и (1.15), можно определять диаметры молекул газов.

В табл. 1.2 приведены значения длины свободного пробега при 1 мм рт. ст. при давлении, равном атмосферному, при температуре 25 °С; а также диаметры молекул некоторых газов.

Таблица 1.2

Газ	$L_a \cdot 10^3$ , см 1 мм рт. ст.	$L_a \cdot 10^6$ , см 760 мм рт. ст.	$\delta \cdot 10^{-8}$ , см
H <sub>2</sub>	9,31	12,26	2,75
Воздух	5,09	6,69	3,74
O <sub>2</sub>	5,40	7,10	3,64
Ar	5,31	6,67	3,67
CO <sub>2</sub>	3,34	4,4	4,65

### 1.2.8. Теплопроводность газов

Если в одной области газа средняя кинетическая энергия молекул больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул между собой происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий, т. е. выравнивание температур.

Процесс передачи энергии в форме теплоты подчиняется закону теплопроводности Фурье:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

где  $q$  – количество теплоты, переносимой за единицу времени через единицу площади в направлении нормали к этой площади;  $\frac{dT}{dx}$  – градиент температуры;  $\lambda$  – теплопроводность.

Количество теплоты, прошедшей через площадь  $S$  за время  $t$ , определяется формулой:

$$Q = q \cdot S \cdot t = -\lambda \frac{dT}{dx} \cdot S \cdot t.$$

Для теплопроводности газа справедлива формула:

$$\lambda = 0,5 \cdot c_V \cdot \rho \cdot \nu_a \cdot L_a,$$

где  $c_V$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Как и в случае вязкости, теплопроводность газа при средних давлениях не зависит от давления ( $\rho \cdot L_a = \text{const}$ ).

При передаче тепла от поверхностей твердых тел газу существуют особенности. Рассмотрим теорию Ленгмюра для механизма передачи тепла от проволок (и от плоских поверхностей) через газ. Экспериментально установлено, что теплоотдача поверхностей зависит практически только от теплопроводности тонкого слоя газа вблизи поверхности; вдали от поверхности теплоперенос происходит за счет конвекционных движений газа, т. е. за счет передачи тепла потоками газа. Эти конвекционные потоки играют роль только при переносе тепла, уже прошедшего через тонкую пленку примыкающего к поверхности газа.

Скорость отдачи тепла поверхностью выражается соотношением:

$$W = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{B},$$

где  $\Delta T$  – падение температуры на поверхностной пленке газа;  $B$  – толщина пленки. Практическое использование этой формулы затруднено, так как теплопроводность  $\lambda$  зависит от температуры газа.

В эксперименте при измерении теплоотдачи платиновыми проволоками в воздухе при давлении 760 мм рт. ст. и температуре воздуха 20 °С было найдено значение  $B = 0,43$  см.

Толщина слоя  $B$  пропорциональна вязкости и обратно пропорциональна плотности газа:

$$B = \text{const} \frac{\eta}{\rho} = \text{const} \cdot \nu_a \cdot L_a = \text{const} \cdot L_a \left( \frac{T}{M} \right)^{1/2}.$$

Последнее выражение позволяет пересчитывать результаты, полученные с одним газом и давлением, к другим условиям эксперимента.

### 1.2.9. Теория диффузии газов

Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное проникновение и перемешивание молекул двух соприкасающихся газов; диффузия сводится к обмену молекулами разных областей газов, возникает и продолжается, пока существует градиент концентрации молекул. Молекулы, перемещаясь, переносят массу газа. Диффузия подчиняется закону Фика:

$$m = -D \frac{d\rho}{dx}.$$

Здесь  $m$  – масса газа, переносимая за единицу времени через единицу площади;  $\frac{d\rho}{dx}$  – градиент плотности диффундирующего газа в области диффузии;  $D$  – коэффициент диффузии.

Коэффициент самодиффузии выражается формулой:

$$D = \frac{1}{3} \nu_a \cdot L_a.$$

Коэффициент диффузии пропорционален вязкости газа и обратно пропорционален его плотности:

$$D \approx \frac{\eta}{\rho}.$$

### **1.2.10. Влияние давления газа на скорость испарения металла**

В атмосфере химически неактивного газа скорость испарения металла будет меньше, чем при испарении металла в вакууме. Это объясняется наличием пленки газа вблизи поверхности испаряющегося металла; через эту пленку вылетающие с поверхности атомы не могут пролететь беспрепятственно, они диффундируют через пленку. Если атом металла достигнет наружного края пленки, он уносится конвекционным током газа и окончательно покинет проволоку. Однако в пленке путь атома оказывается таким сложным, что атом может вернуться на поверхность тела и остаться в ней. В результате имеет место замедление испарения по сравнению с испарением в вакууме.

#### **Вопросы для самоподготовки**

1. Какая прикладная наука рассматривает проблемы изучения и поддержания вакуума?
2. Нарисуйте вид функции распределения абсолютных скоростей газа.
3. Как можно экспериментально вычислить диаметры молекул газов?
4. Что такое давление газа?
5. Как называется скорость молекул газа, при которой наблюдаются максимальные функции распределения?
6. За счет чего происходит выравнивание температуры газа в разных его областях?
7. Что больше – 1 бар или 100 мм рт. ст.? Обоснуйте ответ?
8. Зависит ли теплопроводность газа от давления (средний диапазон давлений)? Почему?
9. Какова количественная характеристика вакуума?
10. Зависит ли скорость испарения металла от давления вакуума?
11. Какая особенность передачи тепла от поверхностей твердых тел газу существует?
12. От чего зависит интенсивность протекания физико-химических процессов в вакууме?
13. Что такое коэффициент конденсации? Чему он равен у металлов?
14. Что такое газ в вакуумной технике?

## 2. ТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ ЧЕРЕЗ ТРУБЫ И ОТВЕРСТИЯ

### 2.1. Понятие вязкостного и молекулярного течения

Характер течения газов в вакуумных системах зависит от того, что происходит чаще – соударения молекул или их столкновения со стенками канала. Преобладание того или иного вида столкновений зависит от отношения длины свободного пробега молекул к характерному размеру канала, по которому протекает газ, например, к радиусу цилиндрической трубы.

Отношение средней длины свободного пробега молекул к характерному размеру канала называется числом Кнудсена.

При высоких давлениях, когда средняя длина пробега мала по сравнению с поперечником канала (число Кнудсена мало) – соударения между молекулами происходят чаще, чем столкновения со стенками. Газ можно рассматривать как сплошную среду, обладающую вязкостью. Анализ течения газа производят исходя из гидродинамических соображений, течение называется вязкостным, важными являются межмолекулярные взаимодействия.

При низких давлениях средняя длина свободного пробега молекул велика в сравнении с поперечником канала, течение газа определяется столкновениями молекул со стенками. Анализ перемещения газа является геометрической задачей определения ограничивающего влияния стенок на свободное движение молекул. Молекулы действуют независимо одна от другой. Поэтому течение при больших числах Кнудсена называется молекулярным течением.

Существует промежуточный режим течения, при промежуточных значениях числа Кнудсена.

Пусть  $L_a$  – средняя длина пробега молекул;  $a$  – характерный размер (поперечник) трубы. Диапазоны течений следующие: при  $\frac{L_a}{a} < 0,01$  – тече-

ние вязкостное; при  $\frac{L_a}{a} > 1,0$  – течение молекулярное; при  $0,01 < \frac{L_a}{a} < 1,0$  – промежуточный режим.

Для воздуха при температуре 25 °С средняя длина свободного пробега:

$$L_a \approx \frac{5 \cdot 10^{-3}}{P_{\text{мм рт. ст.}}} \text{ (см).}$$

## 2.2. Ламинарное и турбулентное течение, число Рейнольдса

Ламинарное течение (лат. *lamina* – «пластинка») – течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций (то есть беспорядочных быстрых изменений скорости и давления).

Турбулентность (от лат. *turbulentus* – бурный, беспорядочный), турбулентное течение – явление, заключающееся в том, что при увеличении скорости течения жидкости или газа в среде самопроизвольно образуются многочисленные нелинейные волны и обычные, линейные различных размеров, без наличия внешних, случайных, возмущающих среду сил и/или при их присутствии. Волны появляются случайно. То есть их размер и амплитуда меняется хаотически в некотором интервале. Они возникают чаще всего либо на границе, у стенки, и/или при разрушении или опрокидывании волны. Турбулентность экспериментально открыта английским инженером Рейнольдсом в 1883 г. при изучении течения несжимаемой жидкости (воды) в трубах.

Число, или критерий Рейнольдса – безразмерная величина, определяющаяся следующим соотношением:

$$R_e = \frac{\rho v L}{\eta},$$

где  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – характерная скорость, м/с;  $L$  – характерная длина элемента потока, м;  $\eta$  – динамическая вязкость среды, Н·с/м<sup>2</sup>.

Для каждого вида течения существует критическое число Рейнольдса,  $R_{e\text{кр}}$ , которое, как принято считать, определяет переход от ламинарного течения к турбулентному. При  $R_e < R_{e\text{кр}}$  течение происходит в ламинарном режиме, при  $R_e > R_{e\text{кр}}$  возможно возникновение турбулентности. Критическое значение числа Рейнольдса зависит от конкретного вида течения (течение в круглой трубе, обтекание шара и т. п.), различных возмущений потока, изменений направленности и модуля вектора скорости потока, шероховатости стенок, близости местных сопротивлений и др.

### 2.3. Пропускная способность и сопротивление трубопроводов

Количество газа в единицу времени, проходящего через трубопровод, характеризуют его потоком  $Q$ :

$$Q = P \cdot \frac{dV}{dt},$$

где  $V$  – объем газа;  $\frac{dV}{dt}$  – объемная скорость течения газа через сечение трубы;  $P$  – давление газа в этом сечении. Так как  $P = nkT$ ,  $n \cdot V = N$  – число молекул в объеме  $V$ , можно записать:

$$Q = kT \frac{dN}{dt}.$$

Таким образом, поток газа  $Q$  прямо пропорционален потоку молекул  $\frac{dN}{dt}$ .

Пусть при входе в канал давление  $P_2$ , у выхода давление  $P_1$ , пропускная способность канала:

$$F = \frac{Q}{P_2 - P_1}.$$

Пропускная способность канала аналогична проводимости в электрических цепях.

Величина, обратная пропускной способности – сопротивление канала  $Z$ :

$$Z = \frac{1}{F}.$$

Если две или несколько труб соединены последовательно, то полное сопротивление системы труб равно сумме сопротивлений отдельных труб.

## 2.4. Вязкостное течение

Величина вязкостного потока через трубу определяется уравнением Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi a^4}{8\eta l} \cdot P_a (P_2 - P_1) = F (P_2 - P_1),$$

где  $a$  – радиус трубы;  $l$  – ее длина;  $\eta$  – вязкость газа;  $P_a$  – среднее арифметическое из  $P_1$  и  $P_2$ .

Пропускная способность трубы при вязкостном течении:

$$F = \frac{\pi a^4}{8\eta l} \cdot P_a.$$

Уравнения Пуазейля справедливы, если газ несжимаем; характер течения одинаков по всей длине трубы, т. е. течение сформировано; движение газа ламинарное; скорость течения у стенок равна нулю.

Когда газ втекает в трубу из большого объема, распределение скорости по сечению трубы однородно. По мере прохождения газа в трубе пристеночные слои газа тормозятся, и характер течения меняется, пока не станет установившимся, когда можно применять уравнение Пуазейля.

Течение устанавливается на расстоянии  $l_e$  от входа в трубу:

$$l_e = 8,13 \cdot 10^{-4} Q.$$

Здесь  $Q$  выражен в  $\frac{\text{Па}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$ .

Существование переходного участка течения в трубах сильнее сказывается в коротких трубах.

Если течение в трубе становится турбулентным, то уравнение Пуазейля не применимо. Турбулентность наступает при числе Рейнольдса  $R_e > 1000$ .

Для воздуха при температуре 25 °С число Рейнольдса равно:

$$R_e = 35,78 \frac{Q}{a} \left( \frac{\text{Па}}{\text{м}^4 \cdot \text{с}} \right).$$

## **2.5. Молекулярное течение**

### **2.5.1. Молекулярное течение через длинные трубы и каналы**

Для цилиндрической трубы радиуса  $a$  и длиной  $l$  пропускная способность при молекулярном течении равна:

$$F = \frac{2}{3} \pi \frac{a^3}{l} \cdot v_a,$$

где  $v_a$  – средняя скорость молекул.

Пропускная способность трубы при низких давлениях значительно меньше, чем при высоких (т. е. при вязкостном режиме).

Для воздуха при температуре 25 °С существует простая формула для пропускной способности трубы (формула Ярвуда):

$$F = 100 \frac{a^3}{l} \text{ л/с.}$$

Здесь  $a$  и  $l$  выражены в сантиметрах.

## 2.5.2. Молекулярное течение через отверстия и короткие трубы

Рассмотрим сосуд, содержащий газ при низком давлении  $P_2$  и постоянной температуре. Пусть в стенке сосуда имеется малое отверстие (по сравнению со средней длиной свободного пробега), через отверстие газ вытекает в сосуд с давлением  $P_1$ .

Полный поток молекул (число молекул, проходящее через отверстие за 1 с) равен:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} \nu_a A (n_2 - n_1),$$

где  $A$  – площадь отверстия.

Так как концентрация газа пропорциональна давлению газа, запишем для объемного потока газа:

$$Q = \frac{1}{4} \nu_a \cdot A (P_2 - P_1).$$

Пропускная способность отверстия:

$$F = \frac{1}{4} \nu_a \cdot A.$$

Для отношения пропускной способности  $F_0$  круглого отверстия к пропускной способности трубы  $F_t$  того же радиуса найдено выражение:

$$\frac{F_0}{F_t} = \frac{3}{8} \frac{l}{a}.$$

Открытый конец длинной трубы имеет свое сопротивление потоку; поэтому полную пропускную способность трубы с учетом отверстия на выходе определяют, как у последовательно соединенных элементов:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_t} + \frac{1}{F_0} = \frac{1}{F_0} \left( 1 + \frac{F_0}{F_t} \right).$$

В табл. 2.1 представлены значения пропускной способности цилиндрических труб и отверстий при температуре 25 °С.

Таблица 2.1

Газ	$M$	$F_t \cdot \frac{l}{a^3}$ , л/с; $l, a$ , см	$F_0 / A$ , л/с; $A$ , см <sup>2</sup>
H <sub>2</sub>	0,002	370,6	44,24
He	0,004	263,0	31,39
Воздух	0,029	97,75	11,67
Ar	0,04	83,28	9,94

## 2.6. Течение в промежуточном режиме

Закономерности течения газа в трубах усложняются в промежуточном диапазоне давлений при переходе от вязкостного течения к молекулярному. При уменьшении давления поведение газа у стенок трубы видоизменяется. При вязкостном режиме молекулы газа у стенок неподвижны, и при уменьшении давления имеет место скольжение газа по стенкам, скорость газа у стенок не равна нулю. В результате пропускная способность увеличивается по сравнению с чисто вязкостным режимом.

Точная количественная теория для промежуточного режима не создана. Для приближенных расчетов используют эмпирические соотношения. Для длинной трубы в промежуточном режиме пропускная способность равна:

$$F = F_v + Z \cdot F_t;$$

$$F = F_t \left( \frac{F_v}{F_t} + Z \right).$$

Здесь  $F_t$  – пропускная способность длинной трубы в молекулярном режиме;  $F_v$  – в вязкостном режиме;  $Z$  – коэффициент, отражающий роль скольжения газа вдоль стенок трубы. Понятно, что  $Z$  зависит от давления,

и в зависимости от значения  $Z$  преобладает или вязкостное, или молекулярное течение

$$Z = \frac{1 + 2,507 \frac{a}{L_a}}{1 + 3,09 \frac{a}{L_a}},$$

где  $L_a$  – средняя длина свободного пробега молекул при среднем по трубе давлении  $P_a$ .

Значения  $Z$  и отношения  $F / F_t$  в зависимости от радиуса трубы и длины пробега приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

$a / L_a$	$Z$	$F / F_t$
$10^3$	0,81	148
10	0,816	2,288
1	0,857	1,004
0,1	0,955	0,97
0,01	0,955	0,997

При расчете натекания в вакуумную систему через малые капиллярные отверстия используют модель промежуточного течения.

Размеры капилляра:  $a = 5 \cdot 10^{-7}$  м;  $l = 10^{-3}$  м. Натекание воздуха из атмосферы идет при температуре 25 °С.  $P_2 = 10^5$  Па;  $P_1 = 0$  Па;  $P_a = 0,5 \cdot 10^5$  Па.

Результаты:  $a / L_a = 3,73$ ;  $F / F_t = 1,4$ .

Поток натекающего газа  $Q = F(P_2 - P_1) = 3,7 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Па} \cdot \text{л}}{\text{с}}$ .

Если вакуумная камера имеет объем  $V = 100$  л, то за час давление в нем вырастет до значения  $P = \frac{Q \cdot t}{V} = \frac{3,7 \cdot 10^{-5} \cdot 3\,600}{100} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$

При увеличении диаметра отверстия в 10 раз (до  $5 \cdot 10^{-6}$  м) натекание увеличится в  $\sim 4\,000$  раз.

## 2.7. Быстрота откачки через трубы и отверстия

В вакуумной технике откачиваемый сосуд и насос соединяют трубами и отверстиями в стенках сосудов. Быстрота откачки насоса достаточно большая, так что давление у входного отверстия насоса можно считать равным нулю. Примем, что пропускная способность системы труб равна  $F$ . Обозначим объем сосуда  $V$ . После начала откачки через некоторое время давление в сосуде стало  $P$ . За 1 с из сосуда удаляется объем газа  $F \cdot P$ . Этот объем и считается быстротой откачки:

$$F \cdot P = -V \frac{dP}{dt}. \quad (2.1)$$

Мы видели, что пропускная способность  $F$  труб изменяется с изменением давления  $P$ , поэтому решение уравнения (2.1) является сложным.

Рассмотрим результаты решения уравнения (2.1) для двух предельных случаев.

1.  $P_2 > 10^{-4}$  атм (10 Па).

Решение уравнения (2.1):

$$\frac{1}{b} \left( \frac{1}{P_2} - \frac{1}{P_1} \right) = t_2 - t_1,$$

т. е. величина  $1/P$  линейно зависит от времени.

Здесь  $P_2$  – давление в момент времени  $t_2$ ;  $P_1$  – в момент  $t_1$

$$t_2 > t_1; \quad P_2 < P_1;$$

$$b = 0,0736 \frac{a \cdot F_t}{c \cdot V},$$

где  $c$  – средняя длина свободного пробега при давлении 0,1 Па.

2.  $P_1 < 0,1$  Па.

$$t_2 - t_1 = \frac{2,303V}{F_t} \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (2.2)$$

Введем понятие константы времени откачки объема.

При изменении давления в 10 раз ( $P_1 / P_2 = 10$ ) из (2.2) получим:

$$t_2 - t_1 = \Delta t_0 = \frac{2,303 V}{F_t}.$$

Здесь  $\Delta t_0$  – интервал времени, достаточный для понижения давления в объеме  $V$  до 1/10 первоначальной величины – константа времени откачки. Через промежуток времени  $2\Delta t_0$  давление в объеме понизится до 1 % от первоначального.

В качестве примера для 1 случая рассмотрим откачку объема 5 л через трубку  $l = 100$  см,  $a = 0,5$  см (табл. 2.3). Пропускная способность  $F_t = 122,2$  см<sup>3</sup>/с.

Таблица 2.3

$P_1$	$P_2$	$t_2 - t_1 = \Delta t_0, \text{ с}$
$10^5$ Па	$10^4$ Па	0,068
$10^4$ Па	$10^3$ Па	0,68
$10^3$ Па	$10^2$ Па	6,16
$10^2$ Па	10 Па	35,8
10 Па	0,1 Па	78,6
— —	— —	— —
0,1 Па	0,01 Па	94,2
0,01 Па	0,001 Па	94,2

В табл. 2.3:  $P_1$  – давление в момент начала откачки;  $P_2$  – давление в объеме 5 л после откачки в течение времени  $\Delta t$  (третий столбец).

Пример для 2 случая режима откачки:

$$V = 100 \text{ л}; \quad l = 20 \text{ см}; \quad a = 10 \text{ см}; \quad F_t = 1\,883 \text{ л/с}.$$

Интервал времени, требуемый для понижения давления до режима молекулярного течения, очень мал.

$$\text{Константа времени } \Delta t_0 = \frac{2,3V}{F_t} = \frac{2,3 \cdot 100}{1\,883} = 0,123 \text{ с}.$$

В случае последовательно соединенных труб их общее сопротивление выражается уравнением:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} + \dots$$

Константу времени  $\Delta t_0$  для полного сопротивления системы труб можно найти по уравнению:

$$\Delta t_0 = (\Delta t_0)_1 + (\Delta t_0)_2 + \dots$$

Следовательно, константа времени последовательно соединенных труб равна сумме констант каждого элемента этой последовательности.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. От чего зависит характер течения газов в вакуумных системах?
2. Что такое вязкостное течение газов в вакуумных системах?
3. Что такое молекулярное течение газов в вакуумных системах?
4. Что такое число Рейнольдса?
5. От чего зависит пропускная способность трубопроводов?
6. В каком случае можно использовать уравнение Пуазейля?

## **3. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ**

### **3.1. Общие замечания о работе вакуумных насосов**

Работа всех вакуумных насосов основана на одном из двух принципов. Чтобы создать вакуум, в откачиваемом пространстве нужно уменьшить общее количество газа. Это достигается или перемещением соответствующего количества газа путем приложения к нему сил в некотором месте системы, откуда он выталкивается каким-либо необратимым способом, или удалением газа путем связывания в процессе химической реакции или конденсации. В первом случае перемещение газа осуществляется каким-либо рабочим механизмом (например, скользящим поршнем или струей жидкости, имеющей высокую скорость); во втором случае поглощение газа достигается или регулируемым введением веществ (например, паров химически активного металла), которые при взаимодействии с газом образуют конденсированную фазу, или подводом газа к холодной поверхности (например, к охлаждаемой ловушке).

### **3.2. Типы насосов**

По принципу действия вакуумные насосы подразделяются на следующие виды.

1. Насосы объемного действия: процесс откачки производится за счет периодического изменения объема рабочей камеры насоса (вращательные, поршневые).

2. Насосы эжекторные: откачка за счет захвата газа струей рабочей жидкости или пара (водоструйные, парозежекторные).

3. Молекулярные насосы: откачка за счет сообщения молекулам откачиваемого газа дополнительной скорости в направлении выхлопа насоса. Скорость может сообщаться движущимися поверхностями твердого тела или струей пара или газа; в последнем случае насосы называют струйными.

4. Насосы ионные: откачка за счет движения ионизированного газа в электрическом поле.

5. Адсорбционные насосы: откачка за счет способности некоторых материалов поглощать газы и пары (геттерные насосы, сорбционные насосы).

6. Криогенные насосы: откачиваемые газы конденсируются при низких температурах.

### 3.3. Основные параметры вакуумных насосов

1. Начальное давление  $P_{\text{нач}}$  – давление на входе в насос, при котором насос начинает работать.

Насосы, которые могут откачивать газы из объемов с первоначальным давлением, равным атмосферному: механические вакуумные, пароэжекторные, водоструйные, сорбционные.

Остальные типы насосов требуют предварительного разрежения откачиваемой вакуумной системы, включая сам насос (пароструйные и др.).

2. Максимальное выпускное давление  $P_{\text{наиб}}$  – давление на выпускной стороне насоса.

3. Предельное (остаточное) давление  $P_{\text{ост}}$  – давление, получаемое в самом насосе при закрытом впускном патрубке. В насосах, использующих рабочие жидкости: воду, масло, – достижимое предельное давление ограничивается значениями упругости паров рабочих жидкостей и паров остаточных газов в откачиваемом объеме.

4. Быстрота откачки  $S_H$  – определяется объемом газа, проходящего через сечение впускного патрубка насоса в единицу времени при определенном впускном давлении. Быстрота откачки измеряется в л/с, м<sup>3</sup>/ч. По мере откачки рабочего объема давление на входе в насос уменьшается, и при достижении предельного давления откачки быстрота откачки равна нулю.

5. Производительность насоса  $Q'_H$  – определяется количеством газа в  $p \cdot V$  единицах, удаляемым насосом в единицу времени при определен-

ном впускном давлении. Производительность насоса уменьшается с уменьшением впускного давления.

Производительность насоса и быстрота откачки связаны соотношением:

$$S_H = \frac{Q'_H}{P_H},$$

где  $P_H$  – давление во впускном патрубке насоса.

Диаграмма областей рабочих давлений основных типов вакуумных насосов представлена на рис. 3.1.

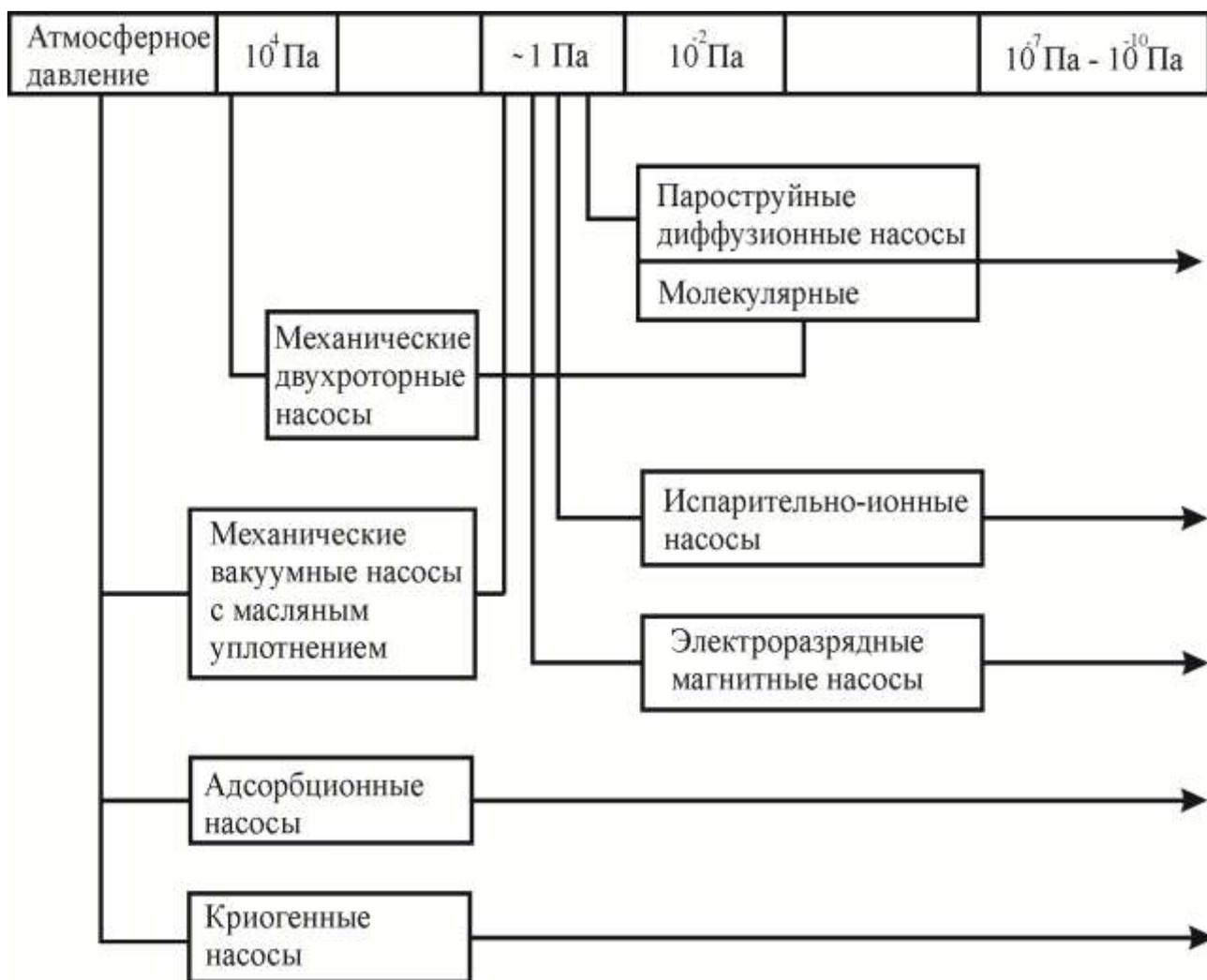


Рис. 3.1. Диаграмма рабочих давлений

### 3.4. Механические вакуумные насосы с масляным уплотнением

Вращательные насосы с масляным уплотнением могут быть пластинчато-роторными, пластинчато-статорными и плунжерными. Схема работы пластинчато-роторного насоса показана на рис. 3.2.

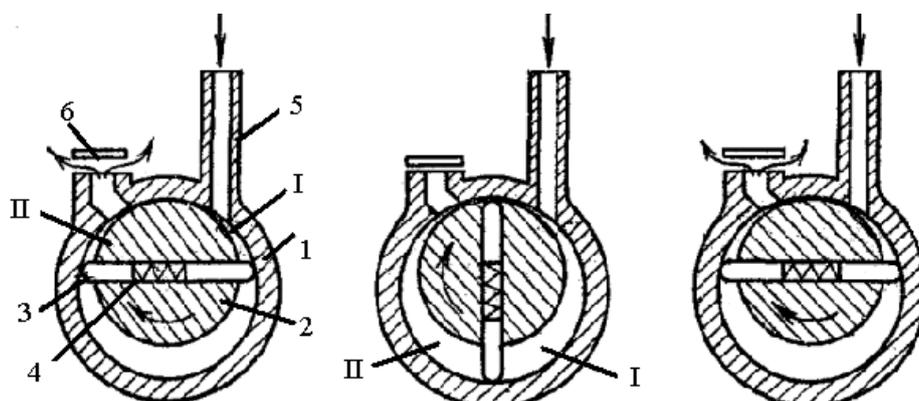


Рис. 3.2. Схема работы пластинчато-роторного вращательного насоса

Насос состоит из стального цилиндра 2, который вращается эксцентрично внутри стального корпуса 1. Выступающие пластинки 3 плотно прижимаются к внутренней стенке пружинами 4, образуя в камере насоса две полости переменного объема: I – полость всасывания и II – полость сжатия. При вращении цилиндра воздух входит в 5 и выталкивается пластинками через клапан 6 в атмосферу. Масло служит смазкой и одновременно препятствует натеканию воздуха в область низкого давления за счет образования пленки между вращающимися и неподвижными частями насоса.

Быстрота откачки 100–150 см<sup>3</sup>/с.

### 3.5. Молекулярные насосы

Принцип действия основан на сообщении молекулам разреженного газа направленной скорости быстро движущейся поверхностью.

В главных чертах принцип действия насоса пояснен на рис. 3.3. Цилиндр *A* вращается вокруг оси *a* (в направлении, указанном стрелкой)

внутри герметичного статора  $B$  и переносит газ из отверстия  $n$  к отверстию  $m$ , вследствие чего возникает разность давлений. В корпусе  $B$  между  $m$  и  $n$  имеется паз, тогда как во всех других участках цилиндр  $A$  и корпус  $B$  почти плотно прилегают друг к другу. Как известно, при достаточно *больших* давлениях вязкость газа не зависит от давления. При этих условиях разность давлений в точках  $o$  и  $p$  (манометр  $M$ ) зависит только от скорости вращения  $\omega$  цилиндра, коэффициента вязкости газа  $\eta$ , длины паза  $l$  и его глубины  $h$  (измеренной в радиальном направлении) в соответствии с уравнением:

$$P_1 - P_2 = \frac{6l\omega\eta}{h^2},$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – давление на выходе и входе соответственно.

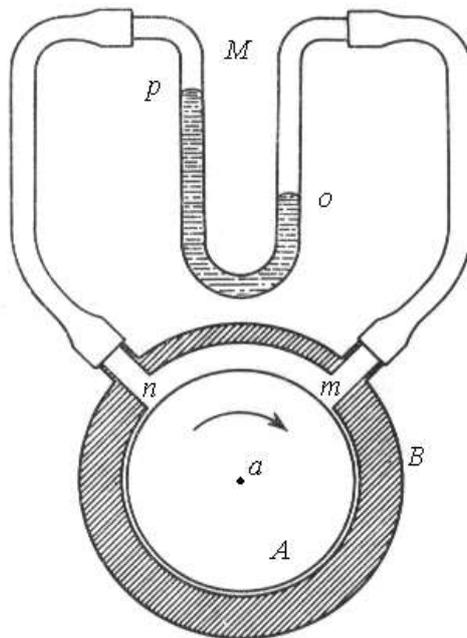


Рис. 3.3. Принцип работы молекулярного насоса

При *низких* давлениях число взаимных столкновений молекул газа становится относительно малым по сравнению с числом столкновений молекул со стенками. Следовательно, при этих условиях молекулы начнут приобретать то же направление движения, какое имеет поверхность, о ко-

тору они ударяются. Таким образом, вместо постоянства разности давлений при неизменной скорости вращения, становится постоянным отношение давлений:

$$P_1 / P_2 = e^{bv},$$

где  $b$  – постоянная, значение которой зависит от рода газа и размеров паза в корпусе  $V$  насоса.

Наибольшее давление на выхлоп таких насосов не более 10 Па.

Преимуществом насосов является малое время их приведения в режим нормальной работы; малое содержание паров масла, выделяемых в откачиваемый объем.

Недостатки – велика трудоемкость изготовления; возможен быстрый износ насосов в связи с большими скоростями вращения (8 000–10 000 об./мин).

Сейчас созданы молекулярные насосы (турбомолекулярные насосы) с ротором в виде набора дисков, вращающихся на одной оси; между соседними дисками установлены неподвижно скрепленные с корпусом перегородки. На этом принципе созданы насосы с быстротой откачки 200–5 000 л/с и предельным давлением откачки  $\sim 10^{-6}$  Па.

### 3.6. Пароструйные высоковакуумные насосы

Насосы имеют важнейшее значение для вакуумной техники, основываются на закономерностях диффузии газов. В насосе создается струя пара рабочей жидкости (масла); молекулы откачиваемого газа диффундируют в эту струю за счет разности парциальных давлений откачиваемого газа в струе и в откачиваемом объеме. Молекулы откачиваемого газа, попав в струю, движутся далее вместе с ней и удаляются из откачиваемого объема. Рабочая жидкость нагревается в кипятильнике нагревателем. Образующийся пар через паропровод поступает к соплу насоса, где пар сжимается, на выходе из сопла расширяется и ускоряется до сверхзвуковой скорости. При попадании струи пара на холодную стенку происходит его конденсация, и конденсат стекает в кипятильник.

Взаимодействие откачиваемого газа с паровой струей зависит от степени вакуума. При низком вакууме молекулы, находящиеся в пограничном с паровой струей слое, за счет внутреннего трения увлекают другие слои газа. Такие насосы называют **эжекторными**.

В области высокого вакуума все молекулы откачиваемого газа, перемещаясь за счет самодиффузии, непосредственно взаимодействуют с движущейся струей пара, а насосы, работающие в таких условиях, называют **диффузионными**.

Быстрота действия насоса зависит от производительности сопла (зависит от параметров диффузионного сопла: зазора  $a$  и угла наклона  $\alpha$ ) и свойств рабочего пара. В эжекторных насосах она лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких тысяч литров в секунду.

Простейший диффузионный насос (рис. 3.4) состоит из кипятильника 1, диффузионного сопла 2, закрепленного на паропроводе б, холодильника 4, впускного и выпускного патрубков 3 и 5. Пары рабочей жидкости из кипятильника проходят по паропроводу через зонтичное сопло и конденсируются на стенках насоса, охлаждаемых холодильником. За время движения пара от конца сопла до стенок насоса в струю пара диффундирует откачиваемый газ. После конденсации образовавшейся парогазовой смеси выделившийся газ откачивается через выпускной патрубок насосом предварительного разрежения, а сконденсированный пар стекает по стенкам насоса в кипятильник через зазор между паропроводом и корпусом насоса.

К рабочим жидкостям пароструйных насосов предъявляются 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 по отношению к материалам насоса;
- малая теплота парообразования.

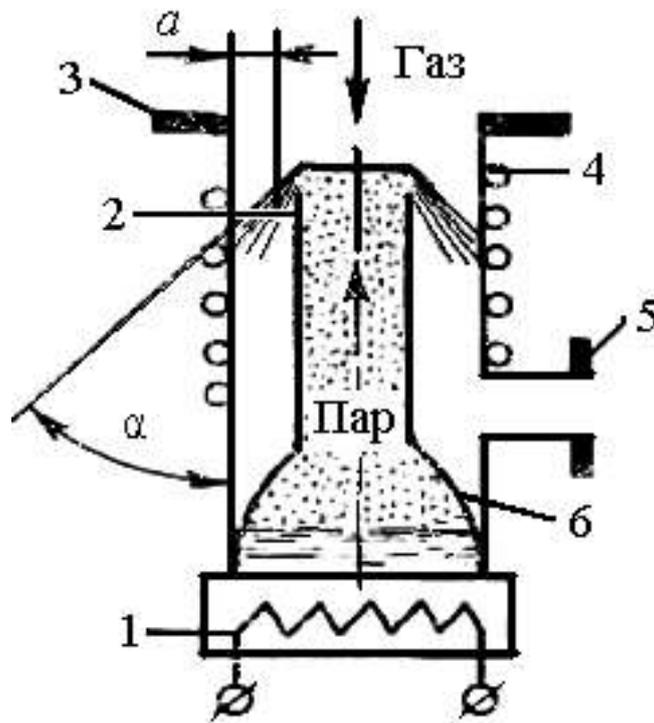


Рис. 3.4. Принцип работы диффузионного насоса

Минимальная упругость паров при комнатной температуре требуется для получения наименьшего предельного давления насоса. Максимальное давление паров при рабочей температуре кипятильника увеличивает выпускное давление насоса и уменьшает требуемую мощность подогревателя. Стойкость к разложению рабочей жидкости при нагревании влияет на срок службы рабочей жидкости и максимальное выпускное давление. Растворимость газов в рабочей жидкости приводит к увеличению обратного потока газов через сопло вместе с паровой струей. Химическая стойкость определяет срок службы рабочей жидкости и накладывает ограничения на выбор конструкционных материалов насосов. При малой теплоте парообразования требуется меньшая мощность подогревателя насоса.

В качестве рабочей жидкости используют нефтяные масла специальной перегонки и кремнийорганические жидкости. Рабочие жидкости должны обладать малой упругостью своих паров, чтобы не загрязнять откачиваемые объемы. Достижимы предельные давления до  $10^{-7}$  Па; производительность откачки до 200 000 л/с.

### 3.7. Электрофизические средства откачки

Принцип действия электрофизических средств откачки основан на различных комбинациях способов генерации пара геттеров, ионизации молекул откачиваемых газов и ускорения образованных ионов с последующим протеканием различных физико-химических процессов при взаимодействии частиц с поверхностью сорбции. По методу нанесения геттерных покрытий различают испарительные геттерные, ионно-геттерные, магнитные электроразрядные и комбинированные насосы.

#### 3.7.1. Испарительные геттерные насосы

Принцип действия испарительных геттерных насосов основан на физическом и химическом связывании газов поверхностями, на которые в процессе работы наносятся слои активных веществ – геттеров.

В качестве геттеров обычно используют пленки титана, циркония, молибдена и других химически активных веществ.

Чтобы откачивающее действие было эффективным, коэффициент прилипания газа  $k_n$  на сорбирующих поверхностях должен быть близким к единице, а время пребывания молекул газа на поверхности сорбции – по возможности продолжительным. Эти условия выполняются при использовании материалов с большой энергией химической связи, а также при снижении температуры сорбирующей поверхности.

Основным фактором при выборе геттера является сорбционная активность пленок. Один из физических показателей этой активности – теплота сорбции  $E$ , определяющая прочность связи сорбированных частиц газа. Значения теплоты сорбции газов на пленках вольфрама при 293 К приведены ниже:

Газ.....	H <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Ar	Kr	Xe
$E$ , ккал/моль.....	46	100	85	194	110	2	4	5

Вследствие малой теплоты сорбции инертных газов, характерной для геттеров, эффективная откачка этих газов испарительными насосами невозможна.

Кроме высокой сорбционной активности, к геттерам предъявляют ряд других требований. Геттер должен легко испаряться при температуре

не слишком высокой, чтобы не испарялись другие материалы вакуумной системы, но и не слишком низкой, чтобы можно было производить обезгаживание системы. Геттер должен иметь низкое давление паров и должен быть активным в широком интервале температур. Образующиеся химические соединения должны быть устойчивы, чтобы поглощенный при температуре окружающей среды газ не выделялся во время работы насоса.

Сорбционные характеристики геттерных пленок сильно зависят от температуры и условий образования. Инертные газы и углеводороды геттерными пленками практически не поглощаются, их удаляют с помощью вспомогательных средств откачки. При этом не удается полностью освободиться от углеводородов, так как они синтезируются на поверхности пленки, играющей роль катализатора. Присутствие углеводородов в составе остаточных газов не позволяет получить остаточное давление ниже  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  Па.

Напыление геттерных пленок на охлаждаемые поверхности (менее 77 К) позволяет получить остаточное давление ниже  $10^{-9}$  Па. Значительное повышение скорости поглощения газов при этой температуре объясняется также увеличением физической адсорбции.

Удельная скорость откачки зависит от давления газа и скорости осаждения геттера.

Быстрота откачки  $1 \text{ см}^2$  титановой пленки при температуре сорбирующей поверхности 293 К составляет по водороду  $4 \text{ дм}^3/\text{с}$ , по азоту  $5 \text{ дм}^3/\text{с}$ , при температуре 77 К по водороду  $23 \text{ дм}^3/\text{с}$ , по азоту  $10 \text{ дм}^3/\text{с}$ . Если пленка титана наносится на неохлаждаемую поверхность, то остаточное давление порядка  $10^{-6}$ – $10^{-8}$  Па. При охлаждении поверхности до 77 К (жидким азотом) остаточное давление менее  $10^{-9}$  Па.

В агрегате использован электронно-лучевой жидкофазный испаритель с периодической подачей в зону расплава титановой проволоки диаметром 1,5 мм. Электронно-лучевой испаритель титана характеризуется малыми тепловыми потерями, что позволяет осуществлять напыление на азотоохлаждаемый вкладыш. В состав агрегата входит паромасляный насос для откачки инертных газов.

На рис. 3.5 приведена компоновочная схема вакуумного агрегата на базе сверхвысоковакуумного титанового насоса (1 – корпус; 2 – сосуд

Дьюара с жидким азотом; 3 – электронно-лучевой испаритель с механизмом подачи титановой проволоки; 4 – азотная ловушка; 5 – патрубок для подсоединения к паромасляному насосу (далее к механическому насосу); 6 – азотоохлаждаемый вкладыш).

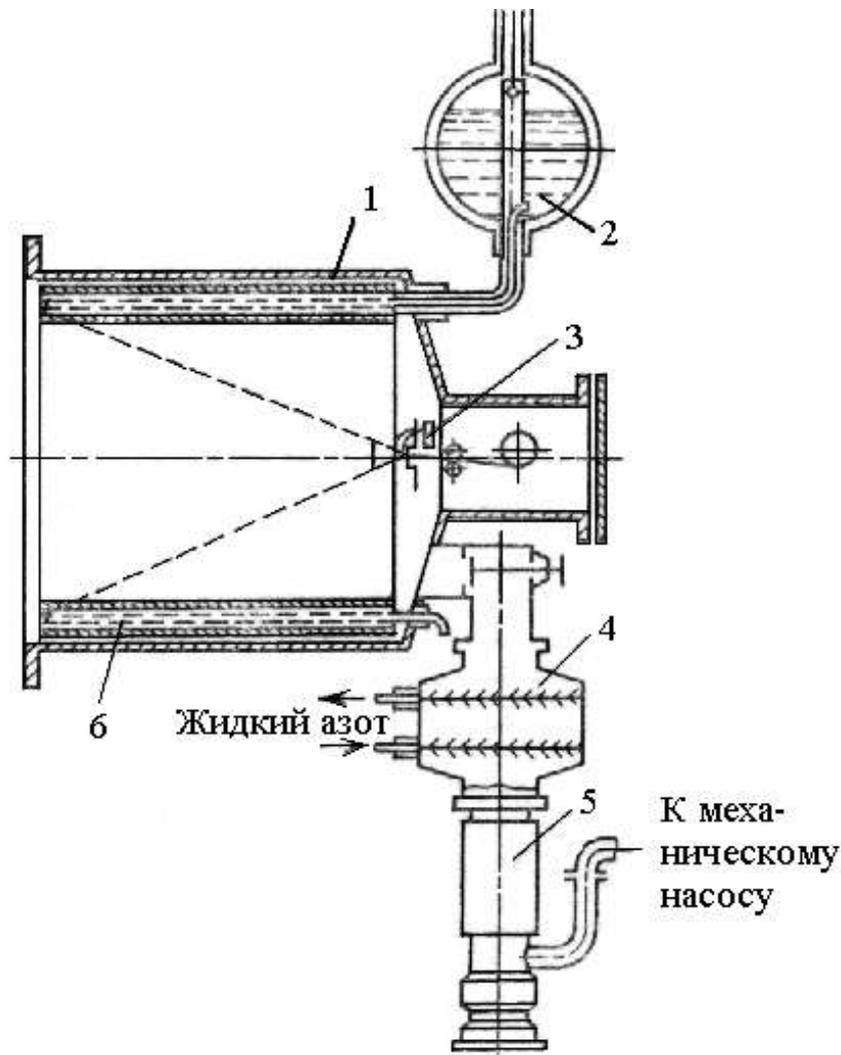


Рис. 3.5. Схема высоковакуумного агрегата АВТО-20М

### **3.7.2. Испарительные ионно-геттерные насосы**

Существующие способы откачки газов в ионно-геттерных насосах основаны на различных сочетаниях методов генерации паров сорбционно-активных металлов и методов повышения ионизирующей способности электронов в электрических разрядах.

Принцип работы насосов этого типа основан на удалении молекул откачиваемого газа в результате его ионизации, испарения химически активных

металлов, хемосорбции активных газов, внедрения ионов инертных газов и их «замуровывания». Ионизацию газа используют также для диссоциации сложных молекул (паров воды, метана, тяжелых углеводородов).

В насосах откачиваемые газы ионизируются потоком электронов, создаваемым катодом; электроны пролетают к аноду по петлеобразным траекториям. Длина пути электронов в откачиваемом газе при этом многократно возрастает, возрастает и эффективность ионизации газа. В качестве примера рассмотрим устройство ионно-геттерного насоса орбитронного типа (ОГИН) (рис. 3.6).

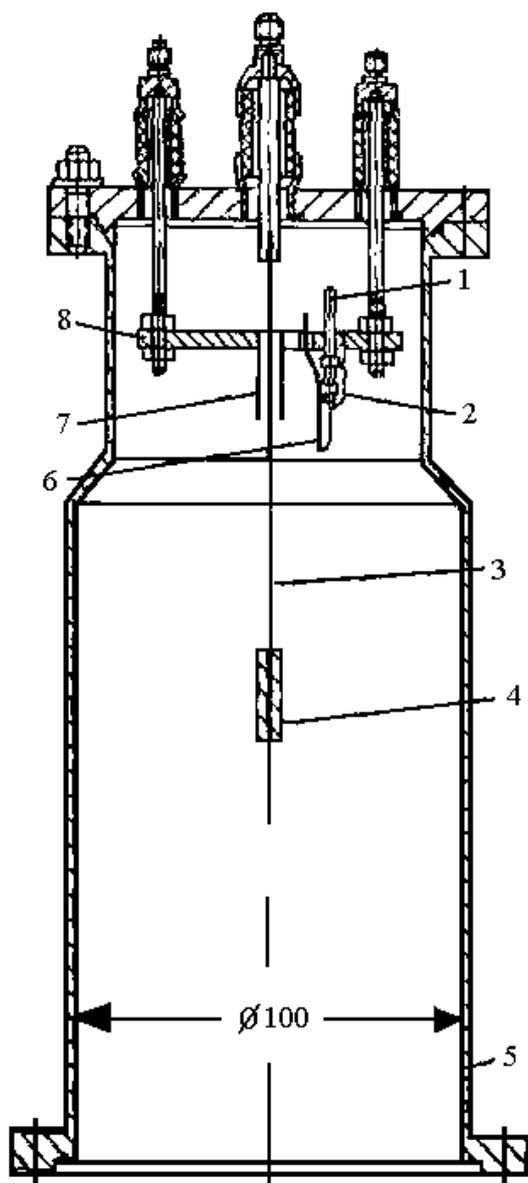


Рис. 3.6. Схема насоса ОГИН:

1 – отражательный электрод; 2 – экран (токоввод); 3 – анод;  
4 – геттер; 5 – корпус; 6 – источник электронов

Здесь электроны, вылетая из прямонакального катода, пролетают по сложной траектории в объеме насоса к аноду – тонкому стержню в центре насоса, ионизируют откачиваемый газ. Ионы заряжены положительно и устремляются к охлаждаемому водой корпусу насоса, на котором при этом откладывается пленка титана, испаренная титановым цилиндром, закрепленным на аноде.

При водяном охлаждении остаточное давление насоса  $10^{-7}-10^{-8}$  Па, при охлаждении жидким азотом – остаточное давление  $\sim 10^{-12}$  Па.

Лучшие значения остаточного давления в ионно-геттерных насосах в сравнении с испарительными обусловлены меньшей поверхностью нагретых частей и большей эффективностью откачки ионизированного газа в сравнении с неионизированным.

### 3.7.3. Магнитные электроразрядные насосы

В магнитных электроразрядных насосах разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях (разряд Пеннинга) используют как для ионизации газов, так и для распыления геттерного материала катодов.

Схема простейшего диодного насоса показана на рис. 3.7.

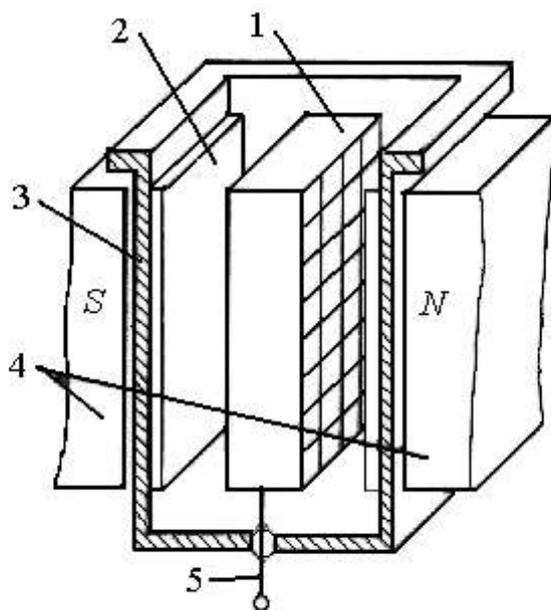


Рис. 3.7. Схема диодного электроразрядного насоса:

1 – анод; 2 – катод; 3 – корпус; 4 – постоянные магниты; 5 – токоввод

В немагнитном корпусе насоса размещена электродная система, состоящая из электроизолированного многоячеистого анода и катодных пластин, установленных перпендикулярно вектору напряженности магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Электрическое поле создается электродами и пространственным зарядом движущейся внутри ячейки плазмы, возникающей в результате ионизации газа и вторичной эмиссии электронов из-за ионной бомбардировки катодных пластин при горении самостоятельного тлеющего разряда. Ионная бомбардировка катодов вызывает распыление геттера, при этом непрерывно возобновляемая пленка распыляемого титана сорбирует молекулы газа, попавшие на ее поверхность.

Чем выше давление газа, тем интенсивнее распыляется титан и поглощается газ; понижение давления уменьшает ионный ток и расход распыляемого титана. Таким образом автоматически регулируется скорость распыления катодов, что обеспечивает экономное расходование геттера и длительный (несколько десятков тысяч часов) ресурс работы.

Механизм откачки газов в электроразрядных насосах во многом сходен с механизмом, определяющим работу испарительных геттерных насосов, но интенсивная ионизация и диссоциация молекул откачиваемого газа в газовом разряде дают возможность использовать насосы этого типа как эффективное средство откачки инертных хазов и углеводородов.

Преимуществом насосов является их почти неограниченный срок службы, полное отсутствие накаливаемых частей.

Предельное оптическое давление до  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Па. Созданы триодные магниторазрядные насосы, имеющие предельное остаточное давление до  $10^{-9}$  Па.

#### **3.7.4. Комбинированные насосы**

Комбинированные насосы представляют собой совокупность нескольких откачных средств, размещенных в едином корпусе: адсорбционного и испарительного геттерного насосов, испарительного геттерного и электроразрядного насосов, электродугового и электроразрядного и др. Целесообразность подобных комбинаций определяется тем, что геттерные на-

сосы эффективно откачивают химически активные газы, но не пригодны для откачки инертных газов (даже в смеси с активными) и углеводородов.

## **3.8. Низкотемпературные средства откачки**

### **3.8.1. Принцип действия**

Действие крионасосов основано на физических явлениях, происходящих при низких температурах, а именно: конденсации газов на охлаждаемых металлических поверхностях (криоконденсационные насосы); адсорбции газов на твердых охлажденных адсорбентах (криoadсорбционные насосы); адсорбции газов на слое предварительно сконденсированного вспомогательного легкоконденсируемого газа (конденсационно-адсорбционные насосы); совместной одновременной конденсации откачиваемого газа и вспомогательного легкоконденсируемого газа (криозахватные насосы); поглощении газов пленками геттера, осаждаемого на криопанель насоса (криогеттерные насосы).

Наиболее прост метод криоконденсации, основанный на конденсации газов на металлических поверхностях, охлажденных до температуры 20 К и ниже. Охлажденная поверхность работает как насос для конденсирующихся при данных температурах газов. Схематично принцип криоконденсационной откачки показан на рис. 3.8, а.

Криoadсорбционный метод основан на сорбции газов твердым сорбентом, нанесенным на криогенную поверхность (рис. 3.8, б). В качестве адсорбентов, наносимых на поверхность криопанелей, наиболее часто используют активированный уголь, цеолиты, силикагели, окисные пленки металлов. Физическая поверхность адсорбентов на много порядков превышает геометрическую поверхность криопанели.

Конденсационно-адсорбционный метод (рис. 3.8, в) представляет собой развитие криoadсорбционного метода. Он основан на применении нового класса адсорбента в виде пористых слоев вспомогательного легкоконденсируемого газа. В качестве вспомогательного газа используют пары воды, двуокись углерода, двуокись серы, окись азота, метилхлорид, тетрагидрид углерода, пары спирта, ацетона, бензина, аргон, азот и др.

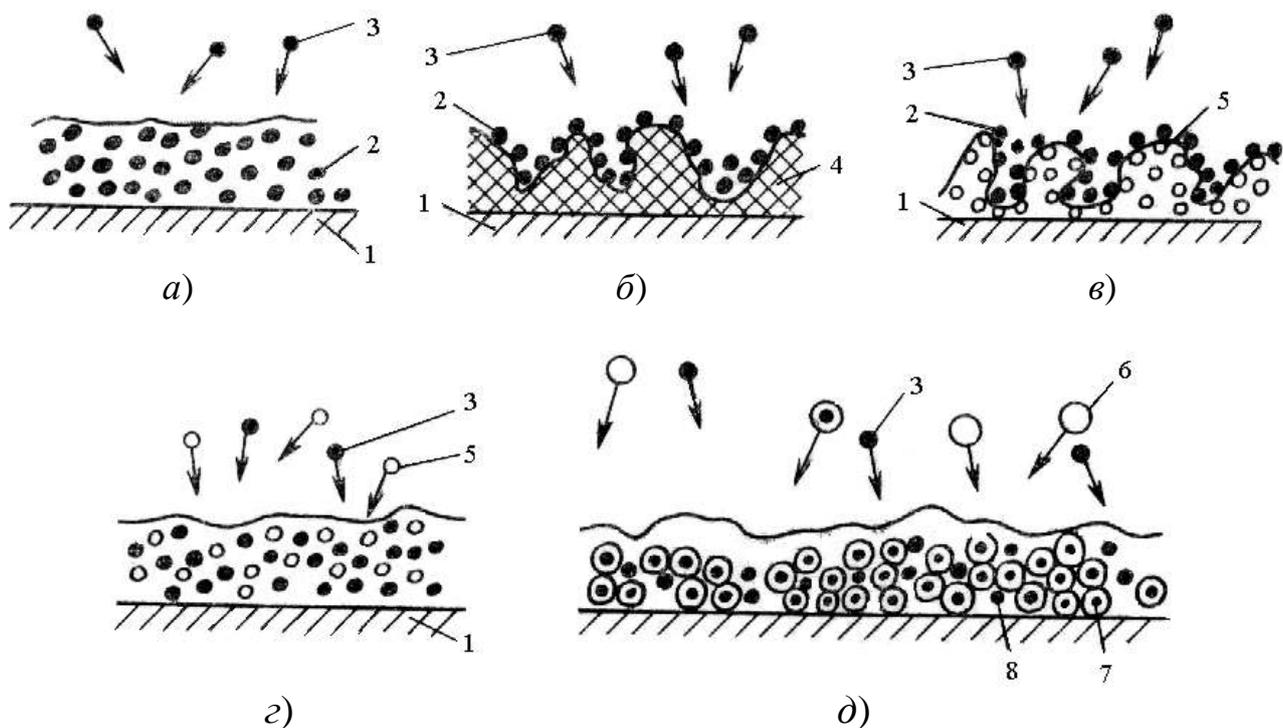


Рис. 3.8. Схема процесса откачки:

*а)* криоконденсационной; *б)* криоадсорбционной; *в)* конденсационно-адсорбционной; *г)* криозахватной; *д)* криогеттерной (*1* – криопанель; *2* – откачанные молекулы; *3* – свободные молекулы; *4* – твердый адсорбент; *5* – сконденсированный вспомогательный газ; *6* – частицы геттера; *7* – хемосорбированные молекулы; *8* – адсорбированные молекулы)

Принцип действия криозахватного насоса заключается в поглощении неконденсируемых газов при одновременной и постоянной подаче на криопанель легкоконденсируемых газов (рис. 3.8, *г*).

При откачке водорода необходим постоянный напуск большого количества двуокиси углерода (50 молей на 1 моль водорода), что увеличивает тепловую нагрузку на крионасос и, следовательно, на холодильную установку. Явление криозахвата всегда сопровождает процесс криоконденсации многокомпонентной смеси газов. Особенно повышается роль криозахвата при откачке водорода в непрогреваемых вакуумных системах, так как основными компонентами в остаточной смеси газов этих систем являются пары воды и двуокись углерода, которые способствуют откачке водорода в результате эффекта криозахвата.

Принцип действия криогеттерного насоса основан на физическом и химическом связывании газов на поверхности и в объеме непрерывно наносимой на криопанель пленки химически активного вещества в качестве которого чаще всего используют титан (рис. 3.8, *д*).

В настоящее время наибольшее распространение получили криоконденсационные и криоадсорбционные насосы.

Принципиальная конструктивная схема крионасоса, несмотря на все многообразие его выполнения, содержит, как правило, четыре основных конструктивных элемента: криопанель, теплозащитный экран, охлаждающее устройство и корпус (рис. 3.9).

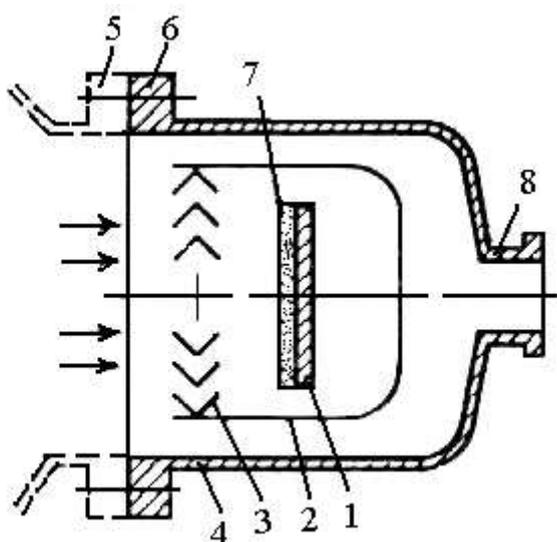


Рис. 3.9. Принципиальная схема крионасоса:

1 – криопанель; 2 – экран; 3 – жалюзийная часть экрана;  
4 – корпус; 5 – фланец камеры; 6 – фланец насоса; 7 – криоосадок; 8 – форвакуумный фланец

Криопанель является основной (откачивающей) частью насоса и представляет собой поверхность, охлажденную до криогенных температур. Криопанели выполняют в виде дисков, цилиндров, змеевиков, сложных систем ребер и т. п.

Криооткачка – процесс эндотермический, так как во время работы насоса на охлажденной поверхности в результате перехода газа в конденса-

рованное (связанное) состояние происходит постоянное выделение теплоты конденсации. Поэтому обязательным условием осуществления этого процесса является постоянный отвод теплоты конденсации и поддержание температуры охлажденной криопанели на требуемом уровне. Кроме того, необходимо отводить тепловую энергию излучения с теплых поверхностей насоса на криопанель.

Теплозащитный экран, выполненный, как правило, в виде жалюзийных решеток, обычно устанавливают между стенками корпуса и криопанелью и охлаждают до температур, промежуточных между температурой стенки корпуса и температурой криопанели. Если теплозащитные экраны не предусмотрены конструкцией, тепловые нагрузки на криопанель резко возрастают и необходимы более мощные охлаждающие устройства.

### **3.8.2. Классификация крионасосов**

Крионасосы классифицируют по следующим основным признакам: принципу действия, температурному уровню криопанели, скорости действия, способу охлаждения криопанели и конструктивной схеме.

Температурный уровень криопанели представляет собой основной фактор, определяющий давление паров откачиваемого газа, а следовательно, и вакуум, создаваемый насосом.

### **3.8.3. Способы охлаждения крионасосов**

Наиболее простой способ охлаждения крионасосов – охлаждение жидким криоагентом, наливаемым в сосуд, наружная поверхность которого служит криопанелью. Наливные насосы выполнены по типу криостатов, поэтому отличаются простотой конструкции и малой стоимостью. Они не требуют подсоединения к электросети, водопроводу или сети сжатого воздуха, в них нет движущихся деталей. Эти насосы легко прогреваются, поэтому их применяют в высоковакуумных системах. В качестве криоагента обычно используют сжиженные газы: азот, неон, водород или гелий, поддерживая температуру криопанели соответственно на уровне 77,3; 27,2; 20,4 или 4,2 К.

Несмотря на относительно высокую стоимость жидкого гелия, ему отдают предпочтение по сравнению с жидким водородом, поскольку последний взрывоопасен. Преимущество жидкого гелия – низкая температура кипения, недостаток – весьма малая скрытая теплота парообразования, а следовательно, необходимость эффективной защиты от теплопритоков к крипанели насоса.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. Два принципа работы вакуумных насосов.
2. Виды вакуумных насосов.
3. Что такое начальное давление вакуумных насосов?
4. Что такое максимальное выпускное давление вакуумных насосов?
5. Принцип действия молекулярных вакуумных насосов?
6. Принцип действия пароструйных вакуумных насосов?
7. Какие жидкости используют в пароструйных диффузионных насосах?
8. Что такое геттер? Приведите примеры геттеров.
9. Основной фактор при выборе геттера.
10. Принцип действия испарительных геттерных насосов.
11. Принцип действия испарительных ионно-геттерных насосов.
12. Как происходит ионизация газа в ионно-геттерных насосах?
13. Принцип действия низкотемпературных средств откачки.
14. Что такое криопанель?
15. Способ охлаждения крионасосов. Что используют в качестве криоагентов?
16. В чем главный недостаток жидкого водорода для использования его в качестве криоагента в крионасосах?

## 4. ВАКУУМНЫЕ ЛОВУШКИ

Вакуумными ловушками называют устройства, служащие для предотвращения проникновения паров рабочих жидкостей вакуумных насосов в откачиваемый объем.

Ловушки подразделяют на высоковакуумные и низковакуумные. Высоковакуумные ловушки предназначены для улавливания паров рабочих жидкостей диффузионных насосов, низковакуумные – для улавливания паров рабочих жидкостей форвакуумных насосов.

Рассмотрим высоковакуумные ловушки. Простейшими ловушками являются механические. На рис. 4.1 показан колпачковый маслоотражатель, устанавливаемый над верхним соплом диффузионного насоса.

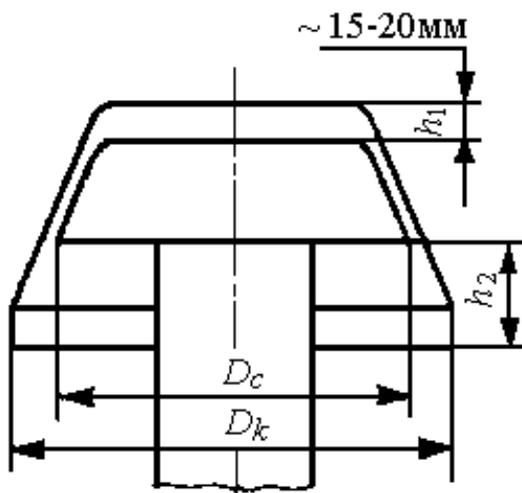


Рис. 4.1. Колпачковый маслоотражатель  
( $h_1 \approx 15-20$  мм;  $h_2 \approx 0,3D_c$ ;  $D_k \approx 1,3D_c$ )

Колпачок установлен на пути паровой струи, уменьшает в 20–30 раз поток паров рабочей жидкости, направленный в сторону откачиваемого объема.

Используют охлаждаемые стеклянные ловушки (рис. 4.2). Во внутренний резервуар ловушки заливают охлаждающую жидкость, например, жидкий азот.

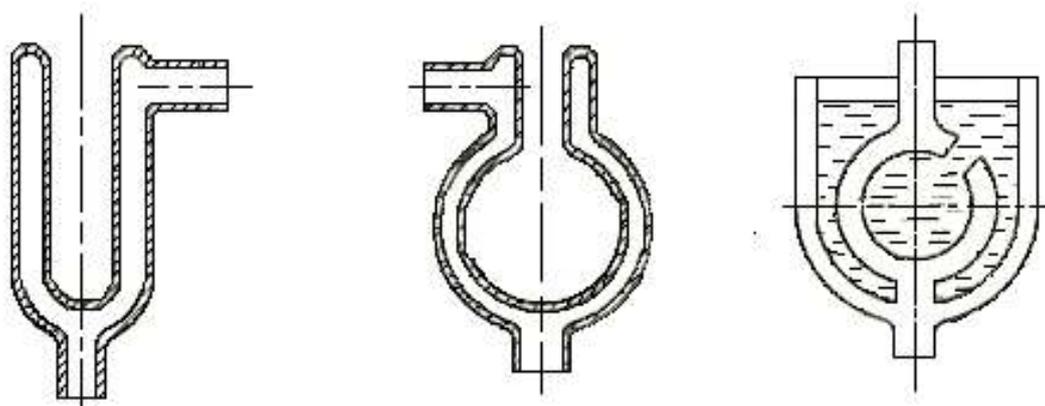


Рис. 4.2. Стеклянные низкотемпературные ловушки

Существуют жалюзийные типы ловушек, устанавливаемые во входной патрубке диффузионного насоса. При условии охлаждения ловушки жидким азотом обеспечивается высокая защитная способность ловушки (более  $10^{-5}$  Па) и в составе остаточных газов нет паров тяжелых углеводородов.

## 5. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА

### 5.1. Тепловые вакуумметры

Работа тепловых вакуумметров основана на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.

Давление измеряется косвенным образом, путем измерения потерь тепла нагретым телом в исследуемой среде.

Горячим телом преобразователя является отрезок металлической нити, накаливаемой электрическим током до температуры 100–200 °С. Устройство преобразователя показано на рис. 5.1.

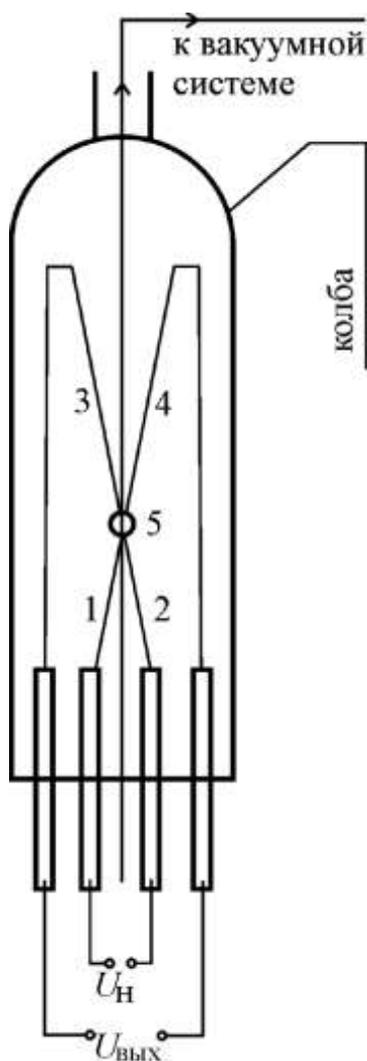


Рис. 5.1. Термопарный измерительный преобразователь давления газа

Накаливаемая проволочка 1-2, согнутая в виде шпильки, размещена в откачиваемой колбе. Холодным телом датчика является колба, теплоотвод от горячего тела к холодному осуществляется через слой газа между проволочками и колбой. К месту изгиба шпильки через каплю 5 изолирующего стекла присоединены проволочки 3 и 4 термопары, которая измеряет температуру накаливаемой нити. Напряжение, генерируемое термопарой, является выходным напряжением датчика. Температура накаливаемой нити зависит, в основном, от тепловых потерь, обусловленных теплопроводностью газа, которые тем больше, чем выше давление. Таким образом, измерение температуры нити позволяет определить давление газа.

Существуют также тепловые вакуумметры, в которых температура нити накаливания измеряется путем измерения ее электрического сопротивления. Диапазон давлений измеряемых тепловыми вакуумметрами от 1 до  $10^3$  Па, градуировочная кривая нелинейная.

## **5.2. Ионизационные вакуумметры**

### **5.2.1. Использование ионизации газа для измерения вакуума**

Атом газа, находящийся в основном энергетическом состоянии, при попадании на него кванта света или быстрой частицы, может перейти в возбужденное состояние или, если энергия частицы велика, атом может потерять электрон, превратившись в положительный ион. Соответствующая энергия частицы называется энергией ионизации атома, она зависит от природы атома.

При неупругом соударении между электроном с энергией  $E$  и изолированным атомом, находящимся в основном (невозбужденном) состоянии, часть энергии электрона поглощается атомом, атом ионизируется за счет вырывания из него собственного электрона. Другая часть энергии столкнувшегося с атомом электрона преобразуется в кинетическую энергию образующейся пары «ион – электрон». Условие ионизации:  $E_i \leq E$ , где  $E_i$  – энергия ионизации атома. Однако эффективность ионизации атомов при столкновениях с электронами не абсолютная, часто столкновение может привести

только к возбуждению, а не к ионизации атома. Вероятность образования положительных ионов зависит от природы газа и от энергии первичных электронов, а также от вероятности столкновения электронов с атомами.

Вероятность образования ионов называется коэффициентом ионизации –  $S_i$ . Зависимость коэффициента ионизации от энергии первичных электронов показана на рис. 5.2.

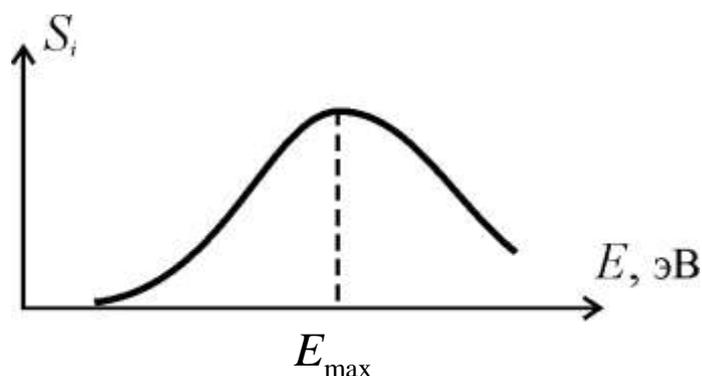


Рис. 5.2. Зависимость коэффициента ионизации газа от энергии ионизирующих электронов

При увеличении энергии от низких значений до  $E_{\max}$  коэффициент ионизации растет, проходит через максимум а затем уменьшается. Обычно  $E_{\max} = 50\text{--}100$  эВ, эта величина зависит от природы газа, от величины давления в газе. При высоком давлении образующиеся вторичные электроны, ускоряясь электрическим полем, могут сами вызывать ионизацию атомов, теряется пропорциональность между числом образующихся ионов и первичным электронным потоком; может даже возникнуть режим самостоятельного (самоподдерживающегося) газового разряда.

### **5.2.2. Ионизационный измерительный преобразователь давления с накаливаемым катодом**

Датчик размещается в стеклянной колбе, соединяемой с объемом, давление которого измеряется (рис. 5.3). По оси датчика проходит металлическая накаливаемая током нить, являющаяся катодом – источником первичных электронов. Положительное напряжение, ускоряющее элек-

троны, подано на сетчатый электрод, являющийся анодом. Электроны, вылетев с катода, ускоряются полем сетки, но так как у сетки промежутки между витками большие, большинство электронов проскакивают сетку, попадают в пространство между сеткой и внешним металлическим цилиндром, являющимся коллектором ионов и заряженным отрицательно.

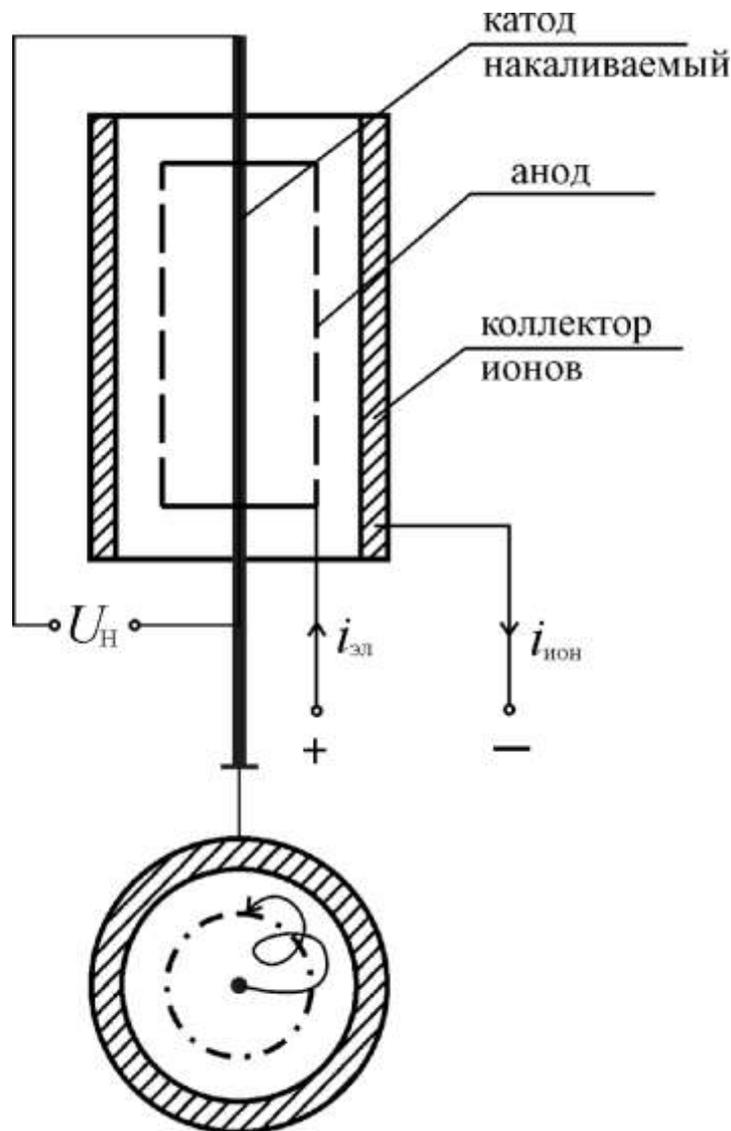


Рис. 5.3. Устройство ионизационного преобразователя

Электроны в этом пространстве тормозятся, возвращаются к сетке, затем к катоду и совершают таким образом несколько колебательных движений. При этом увеличиваются длина траектории в газе и вероят-

ность ионизации. Образующиеся ионы анализируемого газа собираются коллектором, ток коллектора является мерой давления газа.

Ток коллектора равен:

$$i_i = Si_e p,$$

где  $p$  – давление газа;  $i_e$  – электронный ток;  $S$  – чувствительность датчика.

Градуировочная характеристика ионизационного вакуумметра линейная; диапазон измеряемых различными типами вакуумметров давлений  $300-10^{-11}$  Па.

### 5.2.3. Магнитные электроразрядные вакуумметры

Простейший вакуумметр такого типа представляет собой помещенную в магнитное поле двухэлектродную систему, состоящую из катода и анода (рис. 5.4). В системе возникает самостоятельный газовый разряд в скрещенных магнитном и электрическом полях.

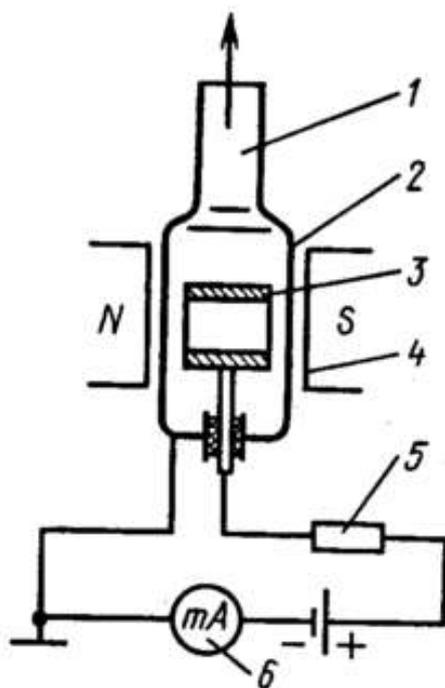


Рис. 5.4. Магнитный электроразрядный вакуумметр:

- 1 – трубка; 2 – катод; 3 – анод; 4 – постоянный магнит;
- 5 – балластный резистор; 6 – микроамперметр

Микроамперметр проградуирован в единицах давления и позволяет по разрядному току определять давления в вакуумной системе.

Вакуумметры позволяют измерять давление в диапазоне  $10^2-10^{-12}$  Па. Благодаря отсутствию накаливаемого катода значительно повышается срок службы преобразователя.

### **Вопросы для самоподготовки**

1. В чем состоит принцип работы тепловых вакуумметров?
2. В чем состоит принцип работы ионизационных вакуумметров?
3. В чем состоит принцип работы магнитных электроразрядных вакуумметров?
4. Что является мерой давления газа в ионизационных вакуумметрах?
5. Что является мерой давления газа в термопарных вакуумметрах?
6. Зачем электрод, являющийся анодом, делают сетчатым в ионизационных вакуумметрах?
7. Что является мерой давления газа в магнитных электроразрядных вакуумметрах?

## 6. СОРБЦИЯ ГАЗОВ И ПАРОВ ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ

### 6.1. Основные понятия сорбции газов

Одной из проблем в технике высокого вакуума является удаление газов и паров, присутствующих на внутренних поверхностях стенок вакуумных аппаратов и внутри стенок.

Газ может проникать вглубь твердого тела, растворяясь в веществе тела. Это явление называется абсорбцией. Газ может также взаимодействовать с поверхностью твердого тела; поглощение газа с образованием пленки толщиной в одну или несколько молекул на поверхности называется адсорбцией.

Твердое вещество, поглощающее газ, называется сорбентом (адсорбентом, абсорбентом); газ или пар, поглощаемый из газовой фазы, называется сорбатом (адсорбатом, абсорбатом).

Процесс удаления газа из сорбента называется десорбцией.

Явление адсорбции связано с тем, что на поверхности твердого тела силы межмолекулярного взаимодействия молекул тела не скомпенсированы. Атомы или молекулы внешнего слоя атомов тела соединены с атомами тела только с одной стороны, с внутренней стороны слоя, тогда как внутренние слои тела соединены с другими слоями атомов со всех сторон. В результате поверхность тела обладает силой притяжения, которая, конечно, действует только на малых расстояниях, но может удерживать подлетающие к поверхности из газовой фазы молекулы. Таким образом, пограничный слой обладает избытком энергии – свободной поверхностной энергией. При адсорбции молекул эта энергия уменьшается.

В зависимости от характера взаимодействия молекул адсорбата и адсорбента различают физическую адсорбцию и химическую адсорбцию (хемосорбцию).

Физическая адсорбция обусловлена силами межмолекулярного взаимодействия. Процесс физической адсорбции протекает самопроизвольно, при этом выделяется тепловая энергия порядка 20 кДж/моль газа. Если те-

ло с адсорбированным физическим слоем молекул нагревать, то при десорбции вещество удаляется в первоначальном виде, т. е. физическая адсорбция полностью обратима. Физическая адсорбция может быть как монослойной (с образованием мономолекулярного слоя) так и многослойной (полимолекулярной). При физической адсорбции молекулы обладают обычно поверхностной подвижностью.

При хемосорбции между атомами адсорбента и адсорбата образуется химическая связь, т. е. хемосорбция представляет собой химическую реакцию, но область этой реакции ограничена поверхностным слоем. Скорость хемосорбции возрастает при увеличении температуры, нет полной обратимости (при десорбции иногда может выделяться не первоначальное вещество, а продукт реакции). Величина энергии хемосорбции близка к энергиям химических реакций – имеет величину порядка 40–250 кДж/моль. Процессы хемосорбции более избирательны, чем физической адсорбции, т. е. хемосорбируются только молекулы, способные вступать в химические реакции с веществом адсорбента.

Количественной характеристикой адсорбции является степень (доля)  $\theta$  покрытия поверхности:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{\infty}},$$

где  $\Gamma$  и  $\Gamma_{\infty}$  – количество адсорбата при данных условиях и предельно возможная величина монослойной адсорбции.

Десорбция молекул происходит в результате колебательного теплового движения адсорбированной молекулы вдоль направления силы притяжения к адсорбенту. Период таких колебаний  $\tau_0$  обычно составляет  $\sim 10^{-13}$  с. Скорость медленных процессов хемосорбции описывается уравнением:

$$\frac{dq}{dt} = a \exp(-\alpha q),$$

где  $q$  – количество адсорбированного вещества;  $a$  и  $\alpha$  – константы, зависящие от температуры.

При постоянных равновесных условиях скорости адсорбции и десорбции равны друг другу.

Средняя продолжительность времени, которое частица находится в адсорбированном состоянии (время адсорбции), описывается уравнением:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

где  $Q$  – теплота адсорбции;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – термодинамическая температура. Обычно время физической адсорбции  $10^{-12}$ – $10^{-6}$  с, время хемосорбции – свыше 100 с.

Если при постоянной температуре изменять давление газа, то число молекул в адсорбированном слое меняется. Этот процесс описывается изотермой адсорбции.

Для энергетически однородной поверхности адсорбента Ленгмюром получено следующее уравнение изотермы:

$$\theta = bp / (1 + b \cdot p),$$

где  $b$  – константа, зависящая от температуры.

Если весь адсорбированный в монослое молекул газ десорбирован, то его объем может быть значительным и давление газа в сосуде увеличивается. В табл. 6.1 приведены значения числа молекул в  $1 \text{ см}^2$  мономолекулярного слоя и соответствующие объемы газа при  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении.

Таблица 6.1

Газ	$M$ , кг/моль	$N_S \cdot 10^{14}$	$V_{20} \cdot 10^{-5}$ , $\text{см}^3$
$\text{H}_2$	0,002	15,22	6,08
Ar	0,048	8,54	3,41
$\text{N}_2$	0,028	8,1	3,24
$\text{O}_2$	0,032	8,71	3,48
CO	0,028	8,07	3,23
$\text{H}_2\text{O}$	0,018	5,27	2,11

Из данных таблицы видно, что при десорбции монослоя объем газа составляет  $(3-6) \cdot 10^{-5} \text{ см}^3$  при атмосферном давлении; это означает, что если монослой десорбирован в откачанный сосуд с объемом  $1 \text{ см}^3$ , давление в нем вырастет до  $P \sim (3-6) \cdot 10^{-5} \text{ атм} \sim (2-4) \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$

Таким образом, адсорбированный слой может являться в вакуумных процессах источником газа, ухудшающим достижимые пределы остаточного давления в вакуумных камерах.

## **6.2. Влияние сорбционных процессов при откачке вакуумных установок**

Изучение состава остаточного газа в откачанных вакуумных камерах и приборах показало, что он совсем не похож на состав атмосферы. Главные компоненты атмосферы – азот и кислород – почти не заметны, зато  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2$ , содержание которых в атмосфере ничтожно мало, составляют главные доли остаточных газов. Процентное соотношение между этими долями не сохраняется постоянным, а резко изменяется в зависимости от длительности обезгаживания и материала камер и деталей в них.

Для объяснения эффекта рассмотрим условия, существующие в откачиваемых камерах при уменьшении давления.

В плохом вакууме (давление  $\sim 100 \text{ Па}$ ) монослой адсорбированного газа возникает мгновенно (приблизительно за  $1 \text{ мкс}$ ), а количество газа в объеме более чем в 100 раз превышает количество сорбированного газа. При откачке до меньшего давления картина совершенно другая. Время образования адсорбированного слоя сильно возрастает, а количество газа в объеме сосуда ничтожно мало в сравнении с количеством газа на поверхности. При низких давлениях весь газ в вакуумных устройствах сосредоточен только на поверхностях внутри устройств, и состав газа и его давление в объеме целиком определяются физическими процессами на поверхностях.

### **6.3. Влияние поверхностных реакций при термическом обезгаживании вакуумных объемов**

При постепенном нагревании откачиваемых камер существует «очередность» выделения газов из материалов. В первую очередь выделяются физически адсорбированные газы, характеризующие состав той среды, в которой пребывали детали перед откачкой. Это компоненты воздуха, остатки промывочных жидкостей – углеводороды, хлориды. Удаление этих веществ происходит при нагревании до  $\sim 300$  °С за минуты.

При повышении температуры до 600–900 °С из объема металла на поверхность диффундируют с различной скоростью атомы водорода, кислорода, азота и углерода, которые, взаимодействуя с окисной пленкой, всегда имеющейся на поверхности металлов, образуют газы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , метан  $\text{CH}_4$ . Эти газы и выделяются в вакуумный объем, и их роль в общем газовыделении подавляющая. Полностью удалить примеси, диффундирующие в металлах и поверхности при нагревании, невозможно, поэтому на практике добиваются прогреванием и длительной откачкой лишь понижения скорости газовыделения до желаемого уровня.

### **6.4. Влияние обратимости сорбционных процессов**

Адсорбированные и газообразные фазы в вакуумных аппаратах с течением времени, если условия их существования (температура, поток газа через систему и др.) не меняются, приходят к равновесию.

Представим, что условия меняются; например, через систему стал протекать другой газ при той же температуре и давлении, что и прежде. В объеме вследствие десорбции с поверхностей будет присутствовать некоторое время составляющая первоначального газа; вакуумный объем как бы «запомнил» первый газ. Явление «сорбционной памяти» возникает при всех видах сорбционных процессов.

Стенки внутренних объемов вакуумных камер покрыты окислами металлов. На таких стенках адсорбируются компоненты воздуха, поэтому, если камеры не прогреваются до высоких температур, среди остаточных газов велика доля паров  $\text{H}_2\text{O}$  и других атмосферных газов.

## Вопросы для самоконтроля

1. Что такое абсорбция, адсорбция?
2. Чем отличается сорбент от сорбата?
3. Что такое десорбция?
4. В чем состоят главные отличия физической адсорбции от хемосорбции?
5. Физическая адсорбция.
6. Химическая адсорбция.
7. Как влияет температура на обезгаживание вакуумных объемов?
8. Что такое сорбционная память?
9. Что такое время адсорбции?

## 7. ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ СЛОЕВ

### 7.1. Газофазные процессы осаждения слоев

Широкое применение в технологии микросхем нашло использование для получения тонкопленочных покрытий осаждения с использованием химических реакций на поверхности подложки, нагреваемой до высоких температур в химически активной газовой среде. Таким путем получают полупроводниковые и диэлектрические пленки, а также металлы. На рис. 7.1. показан реактор для осаждения поликремния, двуокиси кремния, нитрида кремния. Технологический процесс проводят в реакторах, представляющих собой реакционные камеры, нагреваемые до высокой температуры внешней печью 4. Покрываемые пленками изделия 3 помещают в реакционную камеру и через камеру продувают смесь реагентов 1.

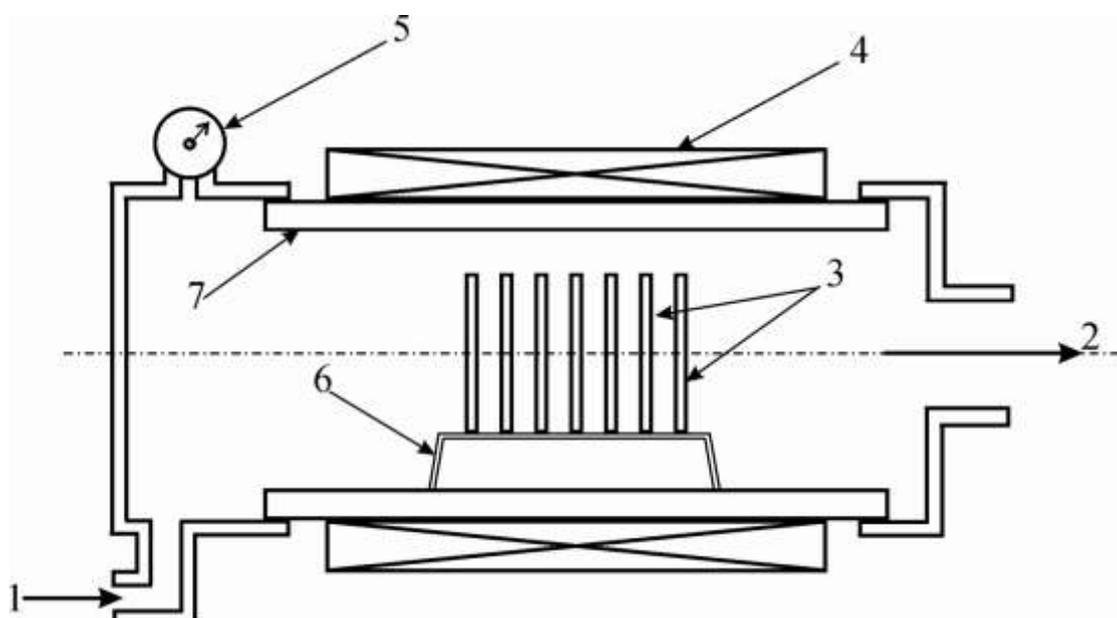


Рис. 7.1. Конструкция реактора для химического осаждения из парогазовых смесей:

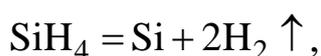
1 – ввод парогазовой смеси; 2 – откачка; 3 – подложки; 4 – трехзонная печь; 5 – манометр; 6 – подложкодержатель; 7 – кварцевая труба

Реакционная камера выполнена из кварцевой трубы 7, откачка камеры 2 производится механическим насосом, давление в камере 30–200 Па, температура 300–900 °С, расход газа 100–1 000 см<sup>3</sup>/мин. Подложки устанавливают вертикально по 50–200 штук.

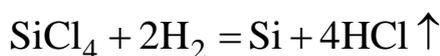
Существуют реакторы, работающие при атмосферном давлении.

При получении пленок типовыми химическими реакциями являются следующие.

Получение поликремния и кремния:



температура реакции 600–650 °С;



температура осаждения 1 000 °С

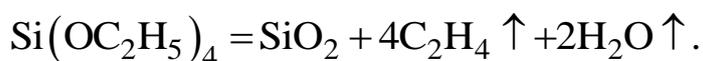
Получение двуокиси кремния:

а) окисление моносилана



Процесс протекает при температурах 400–450 °С, реагенты поступают в камеру в составе газа-носителя аргона, скорость роста ~0,1 мкм/мин;

б) используют также реакцию термического разложения кремнийорганических соединений, в частности, тетраэтоксисилана:



Процесс проводят при температуре 750 °С, скорость роста пленки 0,03 мкм/мин, в вакууме 10 Па.

Рассмотренные реакции протекают на границе двух фаз – газовой среды и твердой подложки, поэтому их называют гетерогенными. Протекание гетерогенных реакций на подложке происходит в несколько стадий:

- адсорбция реагентов на подложках;
- собственно химическая реакция на поверхности;
- поверхностная диффузия осажденных атомов и продуктов реакции;

- десорбция продуктов реакции;
- удаление продуктов реакции с потоком газа-носителя.

Приведенные выше формулы химических реакций являются суммарными формулами нескольких последовательных реакций.

Химические реакции являются обратимыми, и при изменении условий, в которых находятся реагенты и подложка, реакция может пойти в обратном направлении; вместо осаждения вещества слоя на подложку может идти травление слоя. Критерий равновесия реакции при постоянном давлении и температуре среды находится с помощью термодинамического потенциала системы, который называется изобарным (изобарно-изотермическим) потенциалом  $G$  (другое название – свободная энергия, энергия Гиббса).

## 7.2. Термическое испарение в вакууме

При нанесении тонких пленок на подложки методом термического испарения напыляемое вещество нагревают в высоком вакууме до температуры испарения. Пары вещества распространяются в вакууме, достигают подложки и на ней конденсируются. Схема установки нанесения пленок методом термического испарения показана на рис. 7.2.

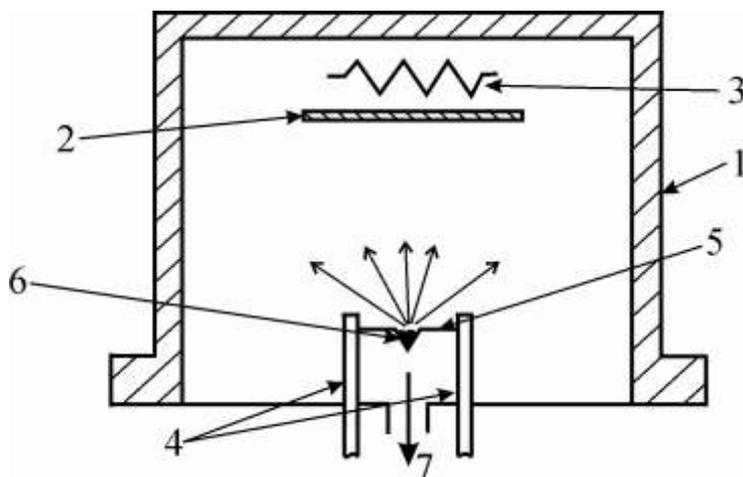


Рис. 7.2. Схема установки нанесения пленок методом термического испарения:

- 1 – вакуумная камера; 2 – подложка; 3 – подогреватель подложки;
- 4 – токовводы; 5 – испаритель; 6 – испаряемое вещество; 7 – путь к высоковакуумному насосу

Для обеспечения отсутствия столкновений атомов пара с молекулами остаточного газа давление в камере испарения должно быть не более  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па при расстоянии от испарителя до подложки  $\sim 20$  см. В таких условиях поток пара представляет собой молекулярный пучок – пучок атомов испаренного вещества.

Для определения зависимости скорости испарения вещества от температуры рассмотрим следующую модель. Будем нагревать вещество в замкнутом сосуде, имеющем такую же температуру, как и вещество. По мере подъема температуры количество испаряемых молекул в сосуде увеличивается; молекулы в объеме сосуда движутся хаотично, и часть из них возвращается к испаряющемуся веществу. Если подъем температуры прекратить, в сосуде установится равновесие, количества испаренных и вернувшихся молекул будут одинаковы. Давление пара в сосуде, установившееся при равновесии, называется давлением насыщенного пара  $P_S$ . Количество вернувшихся в вещество молекул в единицу времени равно числу бомбардирующих его вследствие хаотического движения и определяется законами молекулярно-кинетической теории. Концентрация  $n$  молекул пара равна:

$$n = \frac{P_S}{kT},$$

где  $T$  – термодинамическая температура пара.

Плотность потока молекул пара, ударяющихся о стенку сосуда или любого другого места в сосуде, равна:

$$v = \frac{1}{4} n \cdot v_a,$$

где  $v_a$  – среднее арифметическое значение скорости молекул при температуре  $T$ :

$$v_a = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

Если давление пара в сосуде уменьшить до нуля, количество атомов, испаряющихся из вещества, не изменится, поэтому для плотности потока атомов  $\mu$  испаренного вещества можно записать:

$$\mu = v.$$

Каждый атом уносит с собой массу  $m_0$ , поэтому масса вещества, испаряющегося с единицы поверхности за единицу времени (скорость испарения), равна:

$$v_m = \mu \cdot m_0 = \frac{m_0}{4} \cdot \frac{P_S}{kT} \cdot \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = P_S \sqrt{\frac{m_0}{2\pi kT}} = P_S \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}},$$

где  $M$  – молярная масса испаряющегося вещества;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – термодинамическая температура испарения.

Давление насыщенного пара определяется уравнением Клаузиуса – Клапейрона:

$$P_S = P_0 \frac{T}{T_0} \exp \left[ \frac{LM}{RT_0} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \right].$$

Здесь  $T_0$  – температура кипения испаряющегося вещества при давлении  $P_0 = 10^5$  Па;  $L$  – теплота испарения материала.

Из уравнений видно, что чем больше давление насыщенного пара, тем больше скорость испарения. Температуру вещества, при которой давление насыщенного пара  $P_S = 1,33$  Па, называют условной температурой испарения. Для некоторых веществ температура испарения ниже температуры плавления, т.е. вещества сублимируют.

На каждые 10–15 % превышения температуры вещества сверх его температуры испарения давление паров и скорость испарения возрастают примерно на порядок, форсирование режима перегревом на 30 % приводит к стократному возрастанию скорости испарения.

Количество вещества, достигающее поверхности подложки, зависит от конфигурации испарителя и подложки и их взаимного расположения.

### 7.2.1. Испарение вещества из точечного источника

Вещество из точечного испарителя (рис. 7.3) испаряется во все стороны, т. е. в пределах телесного угла  $4\pi$ . Поток массы вещества в единице телесного угла при неизменной скорости испарения определяется выражением:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{Q}{4\pi t},$$

где  $Q$  – масса испаренного за время  $t$  вещества.

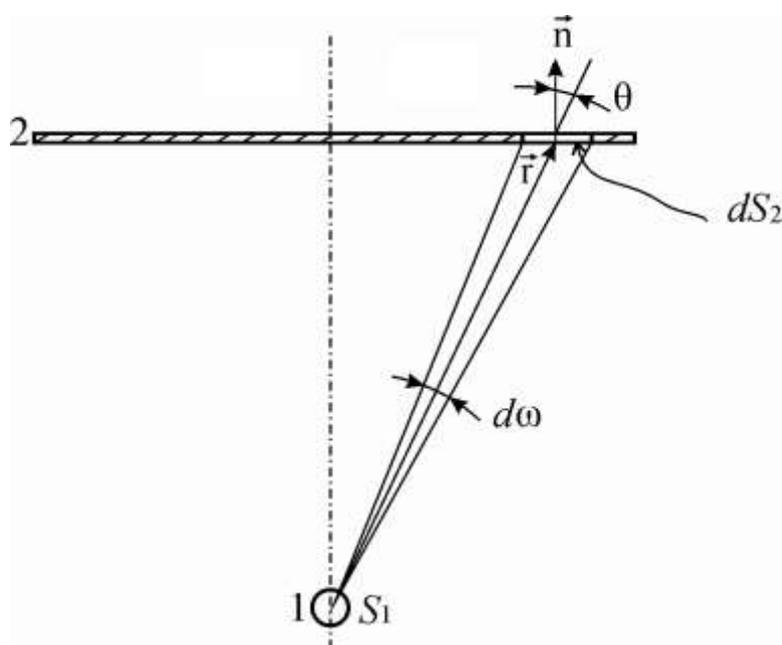


Рис. 7.3. Испарение из точечного источника:

1 – точечный испаритель; 2 – подложка;  $\vec{r}$  – радиус-вектор площадки  $dS_2$  на подложке;  $\vec{n}$  – нормаль к подложке;  $d\omega$  – телесный угол, под которым из испарителя видна площадка  $dS_2$ ;  $S_1$  – поверхность испарителя

На площадку  $dS_2$  пар поступает в пределах телесного угла  $d\omega$ ; масса вещества, поступившего за время  $t$  на площадку  $dS_2$ , равна:

$$\Delta m_2 = dq \cdot d\omega = \frac{Q}{4\pi} d\omega.$$

Величина телесного угла  $d\omega$  связана с размером  $dS_2$  и положением площадки формулой:

$$d\omega = \frac{dS_2}{r^2} \cos \theta.$$

Найдем результирующее выражение для массы количества вещества, поступавшего на площадку  $dS_2$  за все время  $t$  испарения:

$$dm_2 = \frac{Q}{4\pi} \cdot \frac{dS_2 \cos \theta}{r^2}.$$

На подложке на участке  $dS_2$  образуется пленка толщиной  $d$ . Масса этого участка пленки равна:

$$dm_2 = \rho \cdot dS_2 \cdot d,$$

где  $\rho$  – плотность пленки.

Приравниваем правые части двух последних уравнений и получаем толщину образовавшейся в области  $dS_2$  пленки:

$$d = \frac{Q \cos \theta}{4\pi \rho r^2}.$$

### **7.2.2. Испарение из поверхностного испарителя**

Для поверхностного испарителя величина потока пара зависит от направления испарения:

$$dm = \frac{Q}{\pi} \cdot \cos \varphi d\omega,$$

где  $\varphi$  – угол между нормалью к поверхности испарителя и направлением на рассматриваемый участок подложки (рис. 7.4).

Учтем, что элементарный телесный угол:

$$d\omega = \frac{dS_2}{r^2} \cos \theta.$$

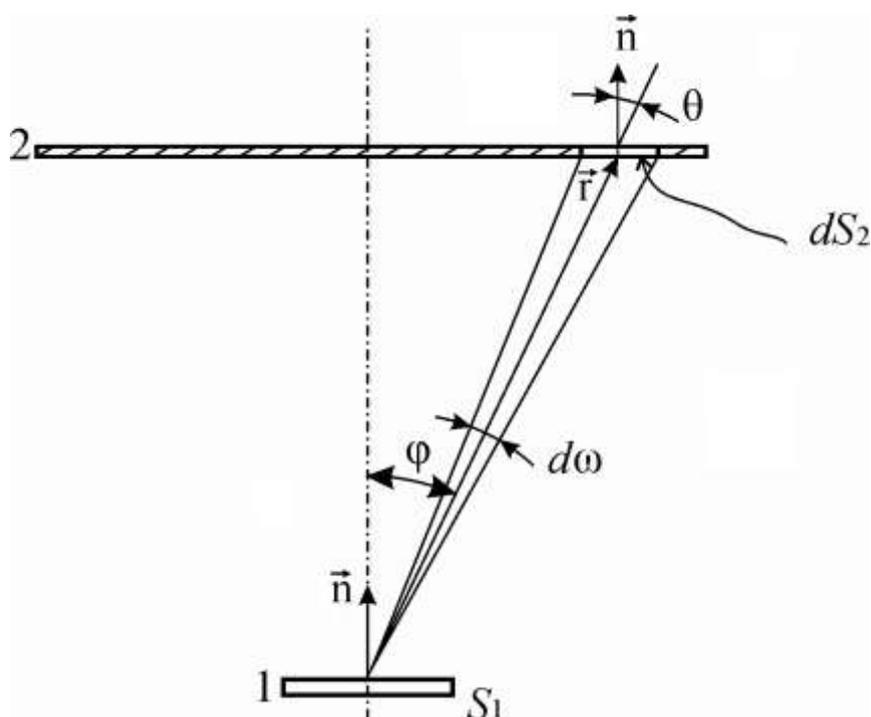


Рис. 7.4. Испарение из поверхностного испарителя:

1 – испаритель; 2 – подложка;  $S_1$  – поверхность испарителя;

$dS_2$  – элементарная площадка на подложке

Можно получить выражение для массы  $dm_{2\Pi}$  осажденного на участке  $dS_2$  вещества в случае поверхностного испарителя, если считать поперечник испарителя малым в сравнении с расстоянием до подложки:

$$dm_{2\Pi} = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{dS_2}{r^2} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta.$$

Для случая параллельных испарителя и подложки:

$$dm_{2\Pi} = \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{dS_2}{r^2} \cdot \cos^2 \varphi.$$

Толщина образующейся на участке  $dS_2$  пленки в случае поверхностного испарителя равна:

$$d_{\Pi} = \frac{Q}{\pi \rho} \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{r^2}.$$

При испарении металлов основным видом частиц в газовой фазе являются одиночные атомы металла. При испарении соединений в составе пара кроме молекул присутствуют их отдельные части, так как возможна диссоциация молекул. Если скорости испарения продуктов диссоциации различны, состав пленки отличается от состава испаряемого соединения, стехиометрический состав пленок нарушается.

Без диссоциации испаряются окислы  $\text{SiO}$ ,  $\text{SiO}_2$ , фторид  $\text{MgF}_2$ . Окислы  $\text{Ti}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Mg}$  испаряются с диссоциацией из ленточных испарителей, нагреваемых электрическим током. Если испарение электронно-лучевое, температура вещества может быть повышенной и степень диссоциации увеличивается. Тем не менее, стехиометрия пленок при электронно-лучевом испарении нарушается в меньшей степени, чем при термическом испарении, вследствие меньшей разницы между скоростями испарения продуктов диссоциации. При испарении сплавов их пары представляют собой потоки индивидуальных атомов, однако отношение парциальных давлений составляющих пара не совпадает с составом сплава. Парциальное давление компоненты сплава над расплавом выражается законом Рауля:

$$P_i = X_i \cdot P_{Si},$$

где  $P_i$  – парциальное давление пара  $i$ -й компоненты над расплавом при некоторой температуре;  $P_{Si}$  – давление насыщенного пара данного компонента в отсутствие других компонент при той же температуре;  $X_i$  – мольная доля  $i$ -й компоненты в расплаве.

Более точное выражение закона Рауля:

$$P_i = f_i \cdot X_i \cdot P_{Si},$$

где  $f_i$  – коэффициент активности данного компонента. На коэффициент активности влияет температура и природа компонентов, он может быть больше или меньше единицы.

При испарении сплава материал в тигле изменяет свой состав, обедняется одним из компонентов.

### 7.2.3. Выбор способа испарения

Выбор испарителя зависит от агрегатного состояния вещества во время испарения. При сублимационном испарении допустимо испаряемый материал нагревать пропусканием через него тока, для этого материал изготавливают в виде проволоки или ленты.

При испарении из жидкого состояния используют подогревные испарители из тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, а также графита и проводящей керамики. Такие испарители делают в виде лодочек. Используют также испарители в виде тиглей из графита или керамики, нагреваемых наружными электронагревателями.

Важной проблемой является взаимодействие испаряемого материала и испарителя при высокой температуре испарения. Опасность представляет взаимное растворение материалов из-за диффузионных процессов: так, например, алюминий в расплаве растворяет вольфрам испарителя, и испаритель перегорает. Во многих случаях имеет место химическое взаимодействие испаряемого вещества с испарителем, например, алюминий, испаряемый из графитового тигля, образует легколетучий карбид алюминия.

Разработаны взрывные испарители (рис. 7.5), в которых с помощью вибродозатора 3 сбрасывают очень малые дозы (10-50 мг) порошка 4 испаряемого материала 5 на перегретый (до 2 000 °С) лабиринтный испаритель (испаритель 1 и лабиринтная крышка 2).

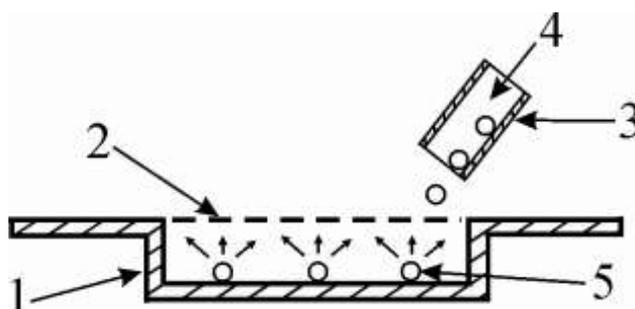


Рис. 7.5. Взрывной испаритель

Кратковременность (до 0,1 с) взаимодействия с материалом испарителя создает условия испарения, благоприятствующие сохранению стехиометрии образующейся пленки.

### 7.2.4. Электронно-лучевые испарители

Для испарения тугоплавких веществ используются электронно-лучевые испарители. Испаряемое вещество электронным пучком может быть нагрето до высоких температур порядка  $3\ 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Испаряемое вещество *1* размещается на металлическом электроде *2*, который должен быть водоохлаждаемым *3*, и подвергается бомбардировке сфокусированным электронным лучом *4* с энергиями электронов  $6\text{--}12\text{ кЭв}$  (рис. 7.6).

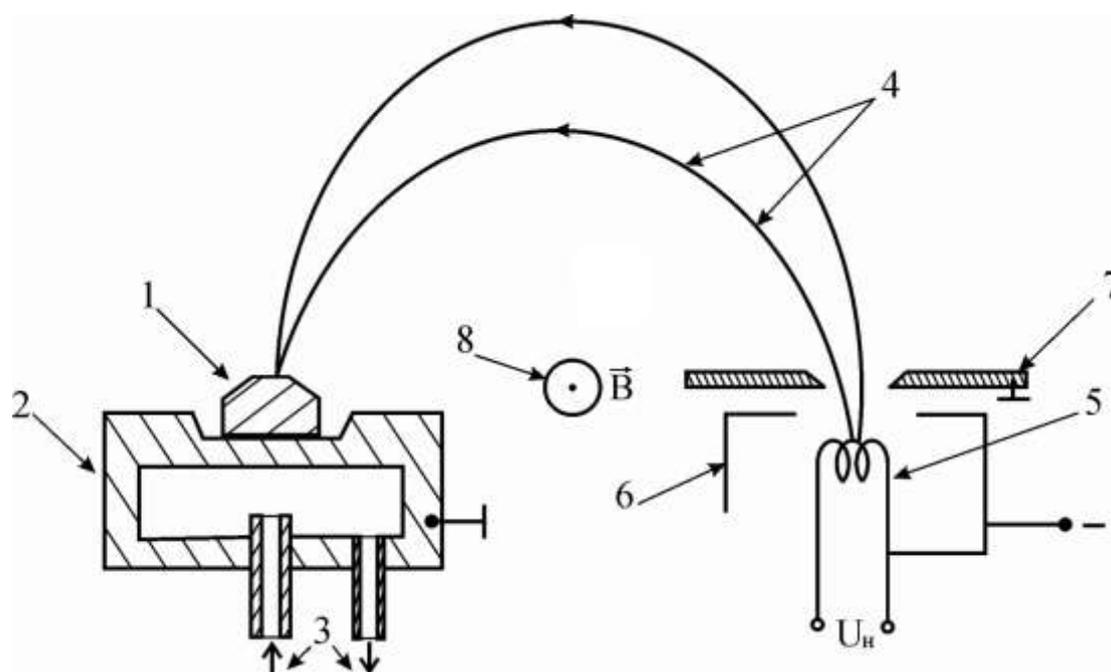


Рис. 7.6. Электронно-лучевой испаритель

Электронный пучок формируется электронной пушкой, состоящей из прямонакального катода *5*, электрода-модулятора *6* и анода *7*. Далее пучок попадает в поперечное постоянное магнитное поле с индукцией  $\bar{B}$  *8*, создаваемое электромагнитами, фокусируется и отклоняется, попадая на испаряемое вещество. Меняя магнитное поле, можно перемещать электронный пучок по навеске испаряемого вещества. Размер фокусного пятна может быть порядка  $1\text{--}2\text{ мм}$ .

При токе луча  $0,2\text{--}0,5\text{ А}$  мощность, выделяющаяся в фокусном пятне, составляет нескольких киловатт.

### **7.2.5. Импульсные лазерные испарители**

Сфокусированный мощный лазерный пучок может нагревать испаряемое вещество до нескольких тысяч градусов, что позволяет любой материал испарять сублимацией, без его плавления. Режим работы лазерных испарителей импульсно-периодический, с длительностью импульсов от сотен наносекунд до микросекунд и частотой импульсов десятки кГц при энергии в импульсе порядка  $10 \text{ Дж/см}^2$ . При лазерном испарении сохраняется стехиометрия напыляемых материалов, меньше сказывается загрязнение остаточными газами, так как процесс испарения имеет место только во время импульса и потому кратковременный, материал испаряется послойно.

## **7.3. Плазменные методы получения тонких пленок**

### **7.3.1. Общие сведения о тлеющем разряде**

В технике нанесения тонких пленок с применением плазмы в разреженном газе используются две основных технологии:

– распыление мишени из осаждающегося вещества ионами плазмы и осаждение атомов мишени на подложке;

– использование химических соединений, вводимых в плазму газа в виде пара; в результате химических реакций в плазме или на подложке оседает тонкая пленка нужного соединения.

Кратко рассмотрим закономерности электрических разрядов в разреженных газах.

В обычных условиях концентрация носителей заряда в газе (электронов и ионов) очень мала, вследствие чего газ – очень хороший диэлектрик. Для получения заметной проводимости необходимо, чтобы в результате ионизации молекул газа в нем возникло достаточно большое количество носителей заряда.

Если газ ионизируется под действием внешнего ионизатора, то разряд в газе считается несамостоятельным.

На рис. 7.7 показана зависимость тока несамостоятельного разряда от напряженности электрического поля.

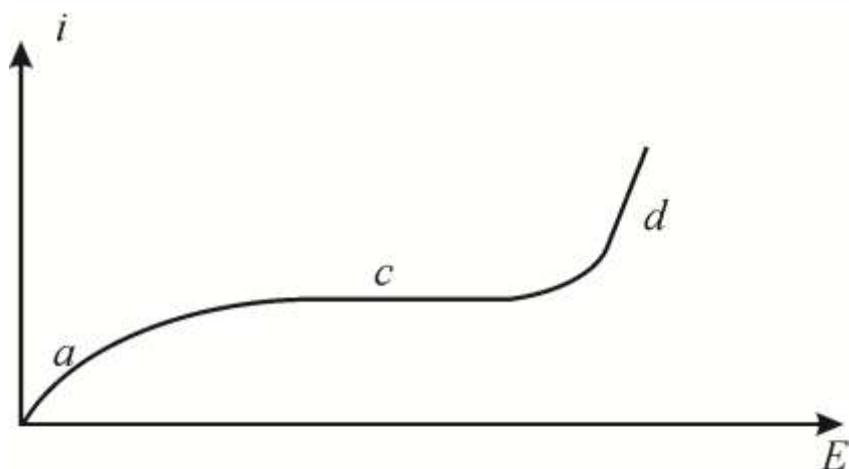


Рис. 7.7. Ток при несамостоятельном разряде в газе

На рис. 7.7 участок  $a$  соответствует применимости закона Ома, участок  $c$  – ток насыщения, при котором все образующиеся под действием внешнего ионизатора электроны и ионы собираются электродами из газа. При увеличении напряженности электрического поля на участке  $d$  начинается крутое возрастание тока, обязанное возникновению ударной ионизации молекул газа. За образование носителей заряда на этом участке ответственна ионизация газа электронным ударом: электроны в газе испытывают соударение с молекулами и если за время между двумя соударениями электроны успевают за счет ускоряющего поля приобрести достаточную энергию, они при ударе ионизуют молекулу; играет также роль выбивание электронов из электродов под действием положительных ионов разряда. Если продолжать увеличивать электрическое поле, количество образующихся в разряде электронов и ионов становится достаточным для ионизации газа и без внешнего ионизатора, наступает пробой газа, происходит переход несамостоятельного разряда в самостоятельный.

Напряжение пробоя однозначно определяется произведением давления газа  $P$  на расстояние между электродами  $l$ . Зависимость напряжения пробоя от указанного произведения  $P \cdot l$  называется законом Пашена (рис. 7.8).

Из рис. 7.8 видно, что наименьшее напряжение пробоя воздуха равно  $\sim 350$  В при  $P \cdot l = 4$  мм рт. ст.  $\cdot$  см. При уменьшении произведения напряжение пробоя воздуха резко возрастает.

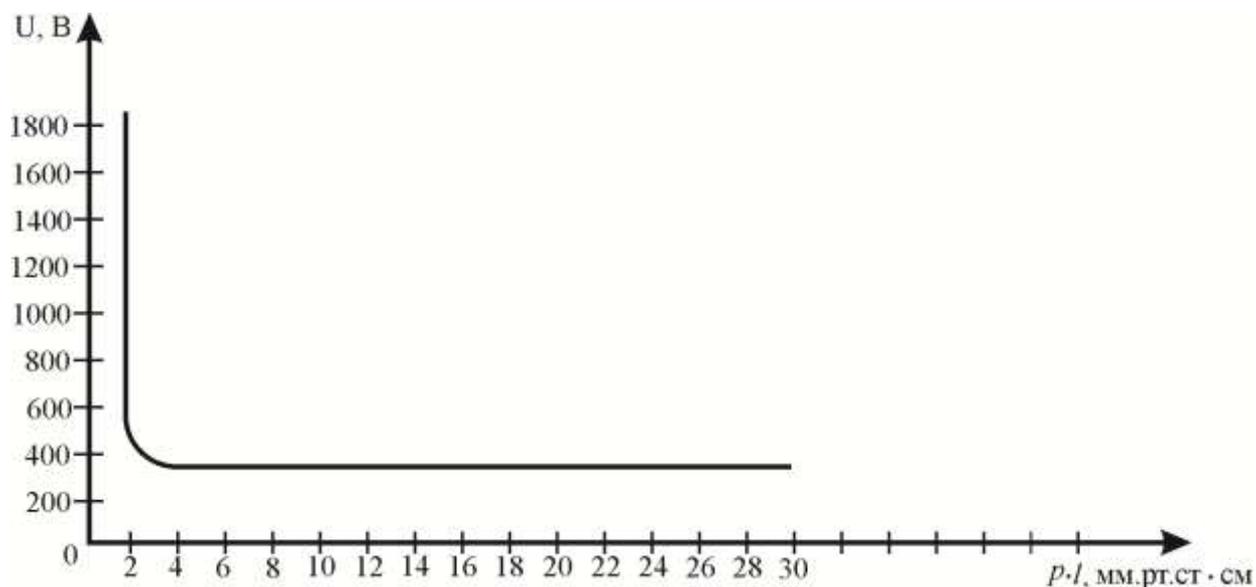


Рис. 7.8. Кривая Пашена для воздуха

Существует несколько типов самостоятельных разрядов в газе – тлеющий, дуговой, коронный, искровой. В технологических процессах получения и обработки тонких пленок используется тлеющий разряд. Особенность тлеющего разряда в том, что источником электронов, необходимых для существования разряда, является холодный катод.

На рис. 7.9 показаны внешний вид и распределение электрического поля в тлеющем разряде в стеклянной трубке.

Тлеющий разряд получил свое название из-за наличия на катоде светящегося слоя 2 (см. рис. 7.9). К слою тлеющего свечения 2 примыкает область 3 фарадеева темного пространства, переходящая в положительный столб свечения 4. В области 1 вблизи катода электрическое  $E$  велико, оно создается положительным пространственным зарядом этой области. Положительные ионы в этой области возникают в результате ионизации атомов газа электронами, вылетевшими из катода, которые, в свою очередь, выбиваются положительными ионами, ускоренными электрическим полем в этой зоне. Эти два явления – ионная бомбардировка катода и эмиссия электронов из катода – и обеспечивают самоподдержание горения тлеющего разряда. Ширина области катодного свечения равна нескольким длинам ионизации электронами атомов; на этом слое имеется большой скачок потенциала разряда – 200–400 В.

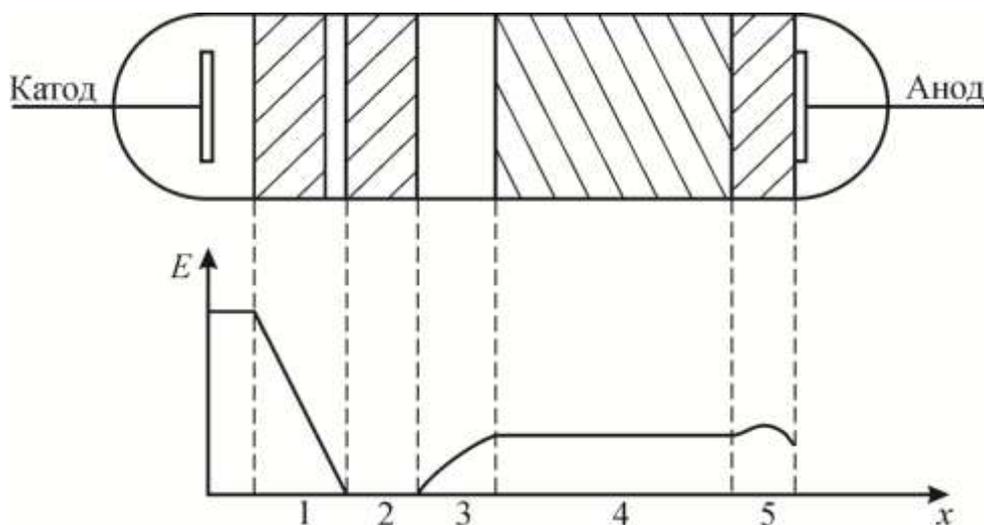


Рис. 7.9. Тлеющий разряд и распределение электрического поля в разряде:

1 – катодный слой; 2 – тлеющее свечение; 3 – фарадеево темное пространство; 4 – положительный столб; 5 – анодный слой

В области положительного столба свечения электрическое поле намного меньше; газ в этой области является плазмой, здесь процессы ионизации газа уравновешены противоположным процессом – рекомбинацией.

Если длину трубки с разрядом сокращать, то длина области положительного столба будет уменьшаться, при этом остальные слои не меняются. Если анод приблизится к слою катодного свечения, то тлеющий разряд потухнет.

При осаждении тонких пленок используют бомбардировку ионами разряда катода, при которой поверхность катода разрушается, в окружающее пространство вылетают его атомы; происходит ионное распыление катода.

Эффективность ионного распыления характеризуется коэффициентом распыления  $K_p$ , который равен числу атомов, выбитых из катода одним ионом:

$$K_p = \frac{N_a}{N_{\text{ион}}},$$

где  $N_a$  – число выбитых атомов;  $N_{\text{ион}}$  – число падающих ионов.

Существуют различные объяснения механизма ионного распыления. Рассмотрим импульсный механизм.

Атомы в материале катода находятся в узлах кристаллической решетки и удерживаются на месте силами межатомных связей. При ударе быстрого иона о такую структуру его импульс  $m\nu$  ( $m$  – масса иона,  $\nu$  – его скорость) передается одному атому, он смещается и передает импульс своего смещения соседним атомам и т. д. по эстафете. Некоторые из атомов получают импульсы в сторону поверхности и могут вылететь с катода.

Коэффициент распыления зависит от энергии иона, массы ионов и атомов катода, угла падения ионов на поверхность катода. На рис. 7.10 показана в качестве примера зависимость коэффициента распыления меди ионами аргона ( $\text{Ar}^+$ ) от энергии иона аргона.

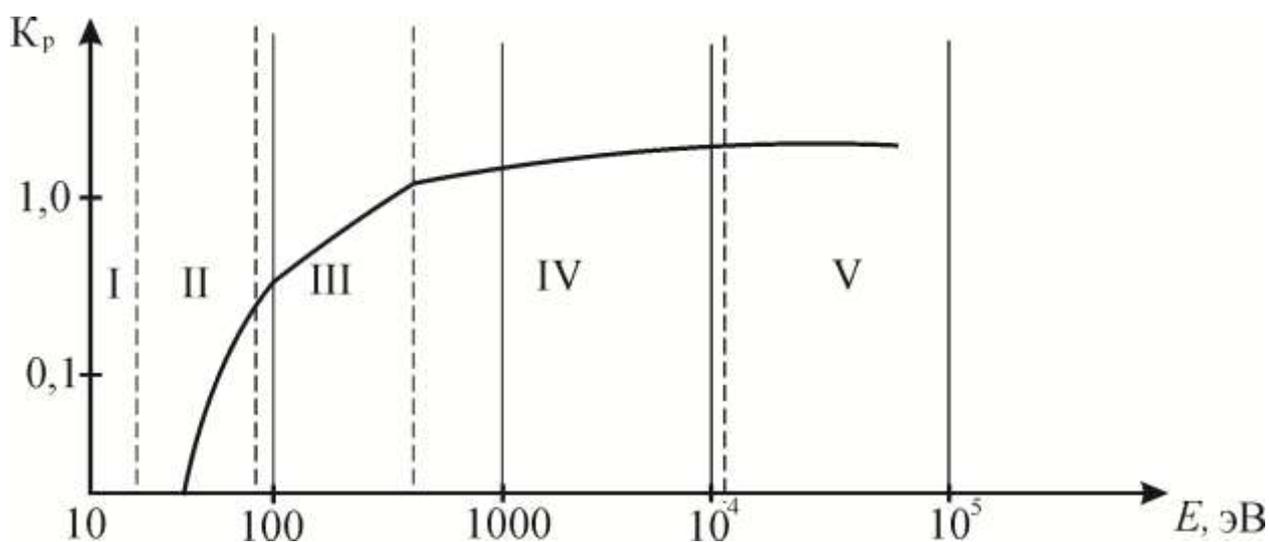


Рис. 7.10. Зависимость коэффициента распыления меди ионами аргона от энергии ионов

В области II распыление начинается и быстро возрастает с ростом энергии. В области III рост скорости распыления от энергии почти линейный; в области IV коэффициент распыления еще растет, эта область используется в технологии получения пленок катодным распылением.

### 7.3.2. Получение пленок ионно-плазменным распылением

На рис. 7.11 показана схема устройства установки катодного распыления.

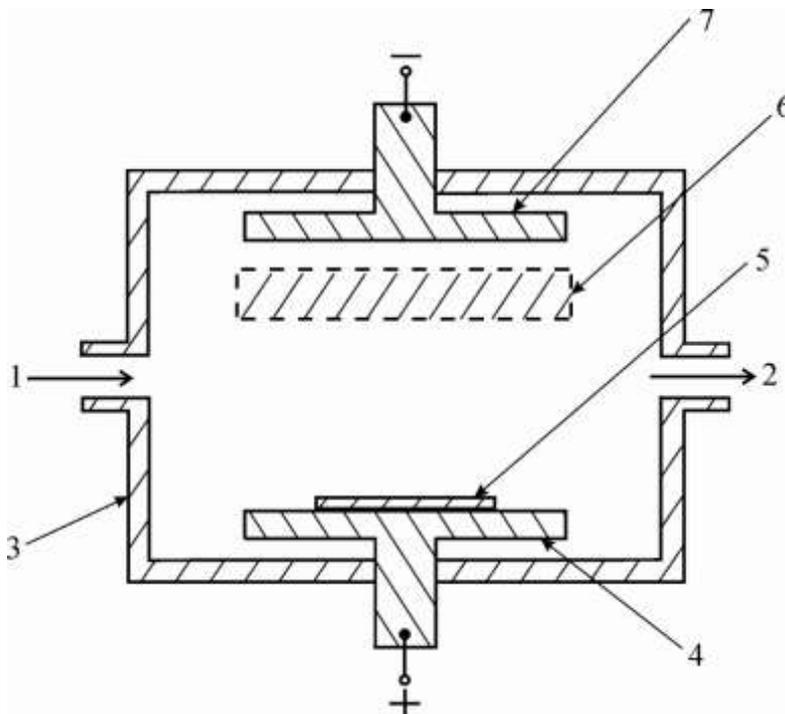


Рис. 7.11. Схема устройства установки катодного распыления:

- 1 – подача газа; 2 – откачка; 3 – вакуумная камера; 4 – анод;  
5 – подложка; 6 – область катодного свечения; 7 – катод

При получении тонких пленок на катоде закрепляется мишень из распыляемого материала, рабочим газом является инертный газ, чаще всего, аргон. Подложки укрепляют на аноде. Установка предварительно откачивается до  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  Па, затем напускается аргон до давления, при котором можно при подаче постоянного напряжения зажечь разряд.

Ионы имеют при падении на катод энергию, соответствующую напряжению  $U_p$  горения разряда. Давление рабочего газа при нанесении пленок порядка  $5 \cdot 10^{-1}$ – $1 \cdot 10^{-1}$  Па, плотность ионного тока  $\sim 1$  мА/см<sup>2</sup>. Скорость роста  $v_{oc}$  пленки материала мишени на подложке зависит от расстояния между катодом и анодом и размеров подложки и мишени:

$$v_{oc} = V_p \cdot \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{r_K^2 - h^2 - r_{II}^2}{\left[ r_K^4 + 2(h^2 - r_{II}^2)r_K^2 + (h^2 + r_{II}^2) \right]^{1/2}} \right\},$$

где  $V_p$  – скорость распыления мишени;  $h$  – расстояние между подложкой и мишенью;  $r_K$  и  $r_{II}$  – радиусы мишени и подложки, соответственно.

Достоинством метода катодного распыления является возможность получения пленок сложного состава с заданным соотношением компонентов. Для этого мишень изготавливают из соответствующего сплава, или выполняют ее составной так, чтобы соотношение количеств распыленного вещества из частей мишени давало пленку с нужным соотношением элементов. Катодное распыление можно применять только при осаждении проводящих веществ – металлов, полупроводников, так как при помещении в разряд диэлектрической мишени ее поверхность зарядится положительно, и ток распыляющих положительных ионов на нее прекратится. Во избежание этого при распылении диэлектриков применяют тлеющий разряд, возбуждаемый высокочастотным напряжением с частотой порядка мегагерц.

### **7.3.3. Магнетронное нанесение пленок**

В тлеющем разряде эффективность ионизации атомов рабочего газа электронами разряда не велика, не более  $10^{-3}$ , плотность ионного тока на мишень не может быть высокой, поэтому скорости напыления пленок низкие.

Для преодоления этого недостатка разработаны более эффективные с точки зрения степени ионизации газа устройства – магнетронные распылительные системы. На рис. 7.12 показана схема устройства нанесения пленок с использованием магнетронного распыления.

Под распыляемым катодом размещают постоянные магниты, которые создают вблизи поверхности катода магнитное поле, силовые линии которого показаны на рисунке пунктиром. Электрическое поле направлено перпендикулярно поверхности катода. В области скрещенных электрического и магнитного полей электроны, вылетевшие с катода, захватываются, их траектории становятся петлеобразными, удлиняется их пробег

в среде, что приводит к увеличению эффективности ионизации газа. На один электрон в разряде при этом может приходиться до 5–10 ионов.

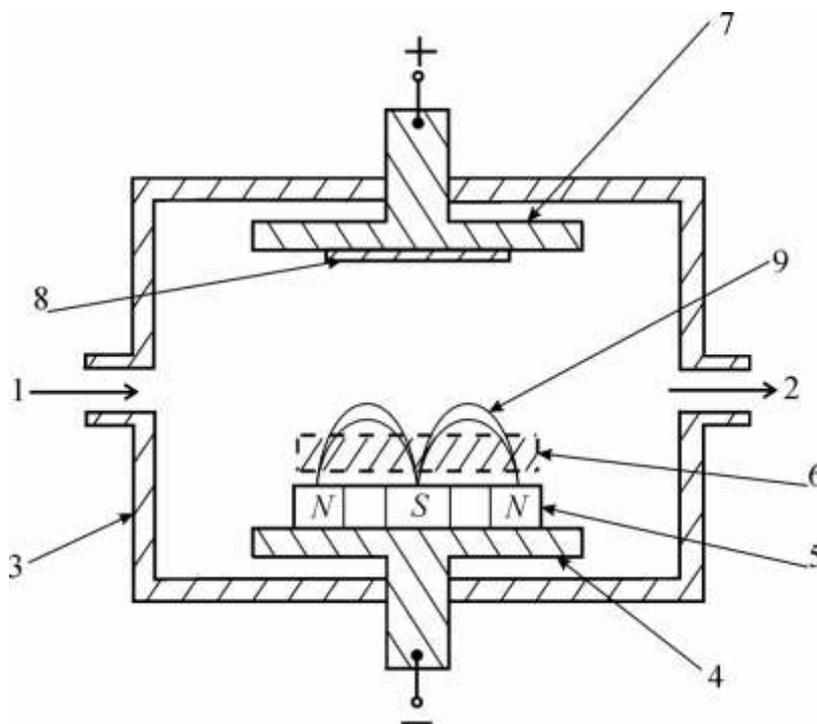


Рис. 7.12. Магнетронное нанесение пленок:

1 – подача газа; 2 – откачка; 3 – вакуумная камера; 4 – катод; 5 – постоянный магнит; 6 – плазма; 7 – анод; 8 – подложка; 9 – магнитное поле

Энергия электронов в магнетронном разряде существенно ниже, чем в тлеющем, а ионные токи существенно выше; уменьшается требуемое давление рабочего газа – до  $\sim 10^{-1}$  Па. Разряд зажигается при давлении  $P = 1$  Па при 250 В, при давлении  $P = 0,1$  Па – при 400 В. Плотность ионного тока на мишень при напряжении на электродах  $\sim 1$  кВ может достигать  $10\text{--}100$   $\text{mA}/\text{cm}^2$ , что существенно выше, чем в тлеющем разряде.

Определенным недостатком является неравномерность распыления мишени – она травится преимущественно в областях с сильным магнитным полем; для обеспечения равномерной толщины пленки на подложке желательны ее перемещения в ходе напыления.

При магнетронном распылении скорость нанесения пленок может быть в десятки раз больше, чем при тлеющем разряде; гораздо меньшим разрядом нагреваются подложки.

## **7.4. Плазмохимическое получение пленок**

Процесс плазмохимического нанесения пленок заключается в том, что в результате стимулированной плазмой химической реакции в газовой фазе образуется твердое вещество, которое осаждается на подложке. При плазмохимическом осаждении подложка может иметь низкую температуру.

Плазмохимическим осаждением можно получать пленки металлов, диэлектриков и полупроводников. В качестве реагентов при плазмохимическом осаждении используют различные элементарноорганические соединения, летучие гидриды, карбонилы и галоидные соединения. Процесс обычно проводят в ВЧ- или СВЧ-плазме.

### **7.4.1. Механизм плазмохимического осаждения пленок**

Процесс плазмохимического осаждения пленок состоит в основном из следующих стадий:

- перевод исходного реагента в парообразное состояние;
- перенос паров реагента к подложке с использованием газа-носителя (аргона);
- стимулированная плазмой реакция с выделением твердого продукта;
- удаление газообразных продуктов реакции и непрореагировавшего реагента из зоны реакции.

Следует отметить два основных типа реакций, которые используются для плазмохимического осаждения пленок:

- реакции разложения химических соединений с выделением металла или другого элемента (кремния, углерода);
- реакции с образованием химических соединений (окислов, нитридов, силицидов).

### 7.4.2. Осаждение пленок металлов

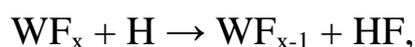
Плазмохимическое осаждение позволяет получать пленки тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена).

В качестве реагентов для плазмохимического осаждения металлов используют летучие фториды, хлориды и карбонилы металлов или металлоорганические соединения.

В качестве примера рассмотрим плазмохимическую реакцию осаждения пленок вольфрама:



В качестве реагента используют гексафторид вольфрама  $\text{WF}_6$  ( $T_{\text{кип}} = 18^\circ\text{C}$ ). При соударении в плазме молекул гексафторида вольфрама с электронами образуются неопределенные фториды вольфрама и атомы фтора, которые должны удаляться из зоны реакции газом-носителем. Если из зоны реакции атомы фтора не удаляются, происходит травление вольфрама. Чтобы избежать травления вольфрама, которое будет преобладать над осаждением пленки металла, особенно если температура подложки выше  $\sim 90^\circ\text{C}$ , в плазму вводят водород. Водород, взаимодействуя со фтором, подавляет травление пленки вольфрама, а также способствует переводу  $\text{WF}_6$  и неопределенных фторидов вольфрама, находящихся в газовой фазе или на поверхности подложки, во фториды меньшей валентности:



где  $1 \leq x \leq 6$ .

Добавление водорода в плазму позволяет использовать повышенную температуру подложки, что способствует получению гладких пленок вольфрама, но уменьшает скорость осаждения пленки вследствие разбавления вольфрамсодержащего реагента.

### 7.4.3. Осаждение неорганических диэлектрических пленок

Получение неорганических диэлектрических пленок на основе кремния (диоксида и нитрида кремния) методом плазмохимического осаждения нашло важное применение для нужд микроэлектроники.

В газовой фазе происходят диссоциация и ионизация силанов или галогенсиланов и азот- или кислородсодержащих соединений, сопровождающиеся их адсорбцией и взаимодействием на поверхности подложки.

Стимулированное ВЧ-плазмой осаждение нитрида и диоксида кремния обычно проводится в системах с внутренними электродами (рис. 7.13). Для согласования ВЧ-цепи, включающей разряд, между источником питания и электродом помещается устройство согласования. Как правило, оно представляет собой катушку индуктивности, шунтирующую электрод, к которому подведена мощность, на землю, и таким образом предотвращающую его отрицательное самосмещение, так что среднее значение потенциала на обоих электродах оказывается примерно равным.

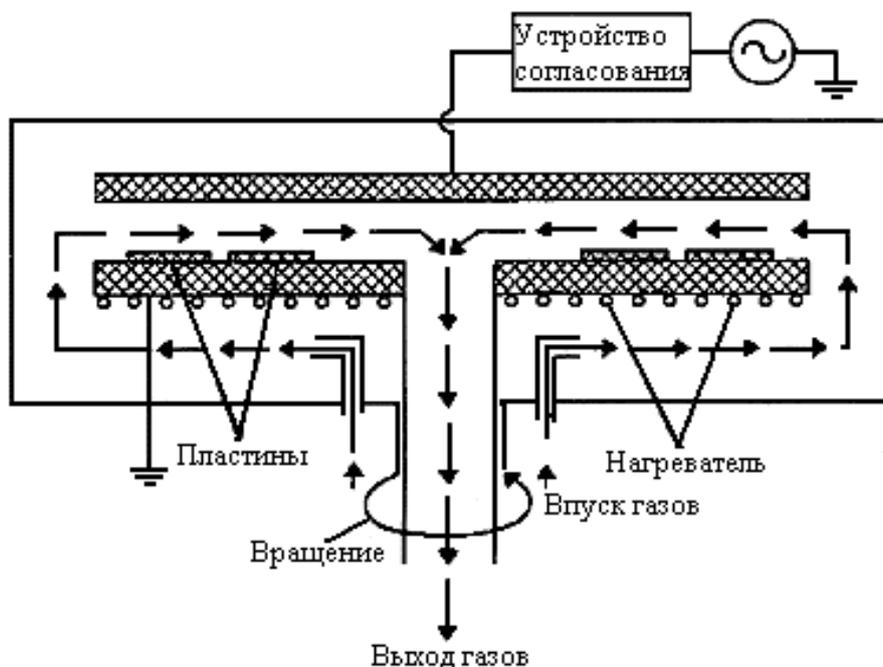
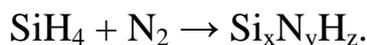
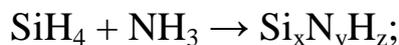


Рис. 7.13. Схема реактора с плоскими параллельными электродами для стимулированного ВЧ-плазмой осаждения диэлектрических пленок

Нитрид кремния формируют при реакции силана с аммиаком в аргонной плазме или путем введения силана в азотный разряд. Результирующие реакции можно записать следующим образом:



Для плазмохимического осаждения диоксида кремния в качестве исходных реагентов обычно используется силан и закись азота или кислород:



Источником кремния может служить также тетрахлорсилан  $\text{SiCl}_4$  или тетраэтоксисилан  $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ .

Применение низкотемпературной ВЧ-плазмы позволяет осаждать пленки диоксида кремния при температуре 250 °С. Однако при этом стехиометрия пленок значительно отличается от пленок, получаемых высокотемпературным окислением. Стехиометрическое соотношение O/Si, как правило, составляет 1,7–1,8, что свидетельствует о недостаточной степени окисления кремния. В пленках обнаруживается значительная концентрация водорода (~5 %), ухудшающего их температурную и временную стабильность. При использовании в качестве окислителя закиси азота или смеси закиси азота с кислородом осажденные пленки содержат небольшое количество азота. Кроме того, применение ВЧ-плазмы приводит к радиационным дефектам в пленке, вносимым заряженными частицами плазмы, к образованию в пленке неконтролируемого встроенного заряда.

Существенный прогресс в решении проблемы плазмохимического осаждения кремнийсодержащих диэлектриков ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) обеспечивает применение СВЧ источников плазмы. Источники СВЧ-плазмы в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) нашли применение и показали свою эффективность в плазмохимическом осаждении диоксида кремния, нитрида кремния, пленок аморфного кремния и углерода. К преимуществам таких источников можно отнести высокую чистоту процесса, как следствие низкого остаточного ( $< 10^{-6}$  Па) и рабочего ( $10^{-3}$ – $10^{-2}$  Па) давлений и отсутствия электродов в камере плазмообразования, низкой энергии ионов, падающих из плазмы на заземленную подложку ( $< 20$  эВ), и возможность точного управления этой энергией с помощью подачи ВЧ-смещения на подложку независимо от мощности, поглощаемой СВЧ-разрядом. Наиболее совершенной представляется конструкция источника СВЧ ЭЦР-плазмы, которая использует принцип мультипольного удержа-

ния плазмы в СВЧ-разрядах, возбуждаемых восемью антеннами, введенными в камеру плазмообразования вблизи стенок и полюсов магнитной системы (рис. 7.14).

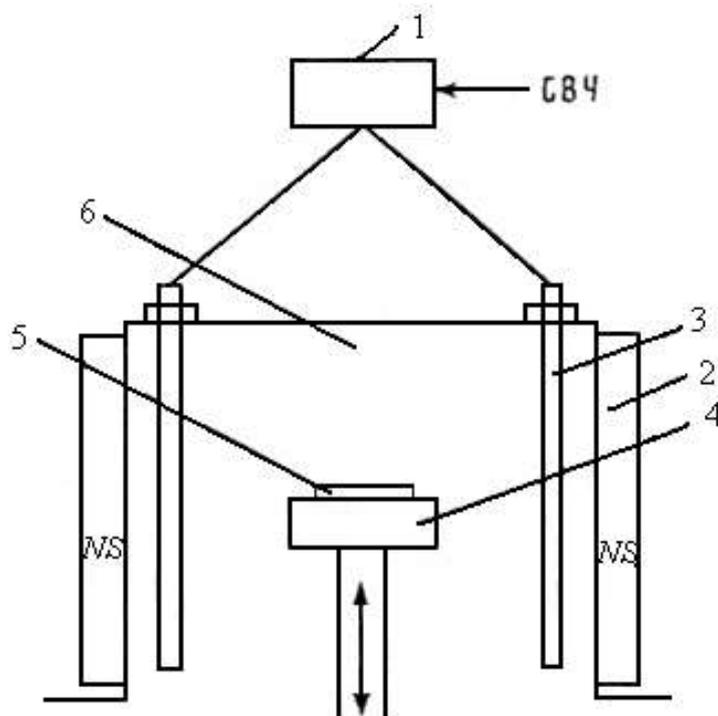


Рис. 7.14. Схема мультиполюсного источника СВЧ ЭЦР-плазмы:

1 – делитель мощности; 2 – магниты; 3 – антенны; 4 – подложкодержатель; 5 – подложка; 6 – камера плазмообразования

Использование мультиполюсного источника распределенной ЭЦР-плазмы позволило получить пленки диоксида кремния, по качеству близкие к термическому окислу, без подогрева подложки с высокой однородностью по толщине и скоростью осаждения путем окисления гесаметилдисилоксана  $(\text{CH}_3)_6\text{Si}_2\text{O}$ . При этом существует возможность планаризации при осаждении пленки на подложку со сложным рельефом за счет приложения ВЧ-смещения к подложкодержателю и одновременного распыления пленки в процессе осаждения, приводящего к сглаживанию рельефа.

#### **7.4.4. Осаждение тонких полимерных пленок**

Химические реакции, происходящие под действием электрических разрядов в парах органических соединений, могут протекать в двух направлениях:

– распад молекул исходного вещества с образованием устойчивых соединений меньшей молекулярной массы, чем у молекул исходного вещества (крекинг);

– образование соединений большей молекулярной массы, чем у молекул исходного вещества (полимеризация).

Установлено, что в зависимости от условий разряда (давления, плотности тока, напряжения) может преобладать одно из этих направлений: в «жестких» условиях разряда (давление в реакционной камере 1–10 Па) протекает процесс распада органических молекул, а в «мягких» условиях (давление более 10 Па) преобладают химические реакции, приводящие к полимеризации.

В отличие от обычных методов полимеризации или поликонденсации, где решающую роль играет наличие в молекулах ненасыщенных связей, циклов или определенных функциональных групп, полимеризация в плазме тлеющего разряда (как постоянного тока, так и ВЧ) имеет место практически для любого органического соединения.

Качественно механизм полимеризации в плазме представляется следующим образом. При неупругом соударении электронов с молекулами в последних происходит возбуждение электронных уровней, которое может привести к диссоциации молекул на осколки (ионы и радикалы). Эти осколки могут вступать в реакцию друг с другом или с молекулами исходного вещества, что приводит к образованию полимеров. Химические реакции, приводящие к получению полимерных пленок в плазме, сложны и многообразны, что обусловлено как относительно большими давлениями (до 100 Па) и плотностями тока (0,1–1 мА/см<sup>2</sup>), так и распределением электронов по энергиям в плазме. Распределение электронов по энергиям приводит к тому, что в молекулах сложных органических веществ уже при первичном акте взаимодействия возбуждаются различные электронные состояния, в результате чего образуются разнообразные осколки диссо-

циации. Кроме того, большие давления в зоне разряда способствуют протеканию вторичных процессов в газовой фазе, т. е. органические молекулы могут распадаться под действием свободных радикалов и атомов водорода, образовавшихся в результате первичных реакций. Скорость образования твердых полимеров в значительной степени определяется соотношением в исходных соединениях углерода и водорода. Наибольшая скорость образования полимеров характерна для ароматических соединений. Она почти на порядок превышает скорость образования полимеров из углеводородов алифатического ряда.

Полимеризация в плазме может протекать как в объеме, так и на поверхности. Полимерные соединения, образующиеся при объемной полимеризации и отлагающиеся на электродах или стенках реактора, являются большей частью порошкообразными веществами с большой пористостью и слабой адгезией к поверхности. При поверхностной полимеризации получают сплошные беспористые пленки, обладающие хорошей адгезией к поверхности и хорошими диэлектрическими свойствами.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Что представляет собой реактор в газофазных процессах осаждения слоев?
2. Газофазные процессы осаждения слоев.
3. При каких условиях поток пара атомов испаренного вещества представляет собой молекулярный пучок?
4. Что такое условная температура испарения?
5. Что такое диссоциация молекул?
6. Термическое испарение в вакууме.
7. Выбор способа испарения.
8. Электронно-лучевое испарение?
9. В чем состоит преимущество магнетронного получения пленок над ионно-плазменным?
10. Назовите основные стадии процесса плазмохимического осаждения пленок.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакуумная техника : справочник / Е. С. Фролов, В. Е. Минайчев, А. Т. Александрова и др.; под общ. ред. Е. С. Фролова, В. Е. Минайчева. – М. : Машиностроение, 1985. – 360 с., ил.
2. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники. – М. : Мир, 1964. – 716 с., ил.
3. Холленд Л. Нанесение тонких пленок в вакууме / Перевод с англ. Н. В. Васильченко. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 608 с., ил.
4. Основы вакуумной техники / А. И. Пипко, В. Я. Плисковский, Б. И. Королев, В. И. Кузнецов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 431 с.

*Учебное издание*

**Никулин Дмитрий Михайлович**

**Чесноков Владимир Владимирович**

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВАКУУМЕ**

Редактор *Е. К. Деханова*

Компьютерная верстка *Н. Ю. Леоновой*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 19.12.2016. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 5,58. Тираж 110 экз. Заказ .

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.