

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

Т.И. Данилина

**ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ
НАНОСТРУКТУР**

*Учебно-методическое пособие
по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе
для подготовки студентов высших учебных заведений технических
специальностей*

Томск – 2022

Рецензент:

д.т.н., профессор кафедры физической электроники Смирнов С.В.

Данилина Т.И.

Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур: Учебно-методическое пособие по аудиторным практическим занятиям и самостоятельной работе – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2022. – 20 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ВВЕДЕНИЕ.....	4
2.	МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ.....	4
3.	ЗАДАНИЯ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	10
4.	ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 1.....	12
5.	ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 2.....	14
6.	ЛИТЕРАТУРА.....	16
	ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	17
	ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	18
	ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	19
	ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	20

1 ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие предназначено для подготовки студентов высших учебных заведений технических специальностей.

Учебно-методическое пособие обеспечивает самостоятельную работу студентов и аудиторные практические занятия по разделам учебного пособия:

- основы вакуумной техники (разделы 1-6);
- термическое испарение в вакууме (раздел 7);
- ионно-плазменные методы получения нанослоёв (раздел 8);
- активируемые плазмой методы получения нанослоёв (раздел 9).

По дисциплине предусмотрены две контрольные работы: первая контрольная работа охватывает материал разделов 1-6, вторая контрольная работа – по разделам 7-9.

Во время аудиторных практических занятий студенты выполняют индивидуальные задания по поставленной задаче.

Учебно-методическое пособие снабжено приложениями со справочными материалами, необходимыми для расчётов.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

При выполнении практических аудиторных заданий и контрольных работ следует руководствоваться учебным пособием по курсу лекций «Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур» [1]. При выполнении заданий необходимо обратить внимание на следующее.

Вакуумные насосы характеризуются следующими основными параметрами:

- быстротой действия S_n ;
- предельным давлением $p_{пр}$;
- давлением запуска $p_з$;
- наибольшим выпускным давлением $p_{вып}$.

Эффективная скорость откачки рабочего объема S_0 отличается от быстроты действия насоса, и при большой проводимости трубопровода U , соединяющего насос с объемом, будет максимальна, т.е. $S_0 \rightarrow S_n$. При этом коэффициент использования насоса будет максимальным, т.е. $K_n \rightarrow 1$. При малой проводимости трубопровода – $S_0 \rightarrow 0$ и $K_n \rightarrow 0$. Проводимость длинных трубопроводов круглого сечения для различных режимов течения газов рассчитывается по формулам учебного пособия [1]. Взаимосвязь трех параметров описывается основным уравнением вакуумной техники.

Предельное давление – это минимальное давление, которое устанавливается в процессе длительной откачки. Предельное давление в

рабочем объеме p будет всегда выше, чем на входе насоса $p_{\text{пр}}$ и это связано с ограниченной проводимостью трубопровода, т.е. $p = \frac{p_{\text{пр}}}{K_{\text{и}}}$.

При выборе вакуумных насосов для установившегося режима должно выполняться два условия:

- 1) быстрота действия насоса $S_{\text{н}}$ должна быть больше расчетного значения;
- 2) предельное давление $p_{\text{пр}}$ насоса должна быть меньше, чем требуемое рабочее давление в объеме p , т.е. $p_{\text{пр}} < K_{\text{и}} \cdot p$.

Для неустановившегося режима выбор насосов делается, исходя из заданного времени откачки.

Производительность насосов любого типа Q определяется как разность между прямым и обратным потоками, т.е.:

$$Q = Q_{\text{пр}} - Q_{\text{обр}}$$

При достижении предельного давления

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{обр}} \quad \text{и} \quad Q = 0$$

Количество газа Q_i , протекающего в единицу времени в любом сечении трубопровода, может быть определено как произведение давления p_i в этом сечении на объем газа S_i , проходящего через него в единицу времени:

$$Q_i = p_i S_i.$$

Это количество газа принято называть потоком газа в данном сечении трубопровода. Обычно поток газа измеряется в следующих единицах:

$$pV / \text{м} = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Поток газа, протекающий во входном сечении вакуумного насоса, $Q_{\text{н}}$ называется производительностью насоса при данном впускном давлении $p_{\text{н}}$.

Так как во всех сечениях трубопровода, соединяющего откачиваемый сосуд с насосом, поток газа Q_i одинаков, то можно записать:

$$Q_i = Q_{\text{н}} = p_{\text{н}} S_{\text{н}} = p S_0 = \text{const}$$

Это уравнение называется уравнением сплошности потока.

Учет составляющих обратного потока ведется с учетом режима откачки (стационарный, нестационарный) и конструкций насосов (механические, паромасляные и др.)

Далее будут рассмотрены примеры решения задач

Тема: «Основные понятия вакуумной техники»

- 1) Определить режимы течения газа по длинному трубопроводу круглого сечения при откачке от давления p_1 до давления p_2 :

$$d = 0,1 \text{ м}; p_1 = 10^5 \text{ Па}; p_2 = 20 \text{ Па}.$$

Решение: Воспользуемся критериями Кнудсена:

$$\text{для молекулярного режима } p_m \cdot d \leq 0,02 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

$$\text{для вязкостного режима } p_v \cdot d \geq 1,33 \text{ Па} \cdot \text{м}$$

Определяем граничное давление для молекулярного режима:

$$p_m \leq \frac{0,02}{0,1} \leq 0,2 \text{ Па}$$

Граничные давления для вязкостного режима течения газа будет:

$$p_v \geq \frac{1,33}{0,1} \geq 13,3 \text{ Па}$$

Таким образом, для заданных условий при откачке от атмосферного давления 10^5 Па до 20 Па имеет место вязкостный режим течения газа.

2) Рассчитать проводимость трубопровода в вязкостном режиме течения газа при среднем давлении газа 50 Па; $d = 0,1$ м; $l = 0,2$ м.

Решение: для вязкостного режима проводимость трубопровода рассчитывается по формуле:

$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot p$$
$$U_B = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{(10^{-1})^4}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot 50 = 34 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Проводимость имеет размерность, аналогичную размерности быстроты откачки, – $\text{м}^3/\text{с}$.

3) Рассчитать проводимость трубопровода при молекулярном режиме течения газа, начальное давление 10^1 Па, конечное давление – 10^{-4} Па; $d = 0,1$ м; $l = 0,2$ м.

Решение: Проверяем выполнение условия для молекулярного режима:

$$p_m = \frac{0,02}{0,1} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$$

Поэтому имеет место молекулярный режим, для которого проводимость не зависит от давления и рассчитывается по формуле:

$$U_m = 38,1 \cdot \frac{d^3}{l} \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}$$

В расчетах принимаем молекулярную массу газа $M=29$ и температуру газа $T=300$ К

$$U_m = 38,1 \cdot \frac{(10^{-1})^3}{2 \cdot 10^{-1}} \cdot \sqrt{\frac{300}{29}} = 0,613 \text{ м}^3/\text{с}.$$

4) Рассчитать эффективную скорость откачки, если быстрота действия насоса составляет $1 \text{ м}^3/\text{с}$, а проводимость трубопровода, соединяющего насос с рабочим объемом, – $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Определить коэффициент использования насоса.

Решение: для расчета воспользуемся основным уравнение вакуумной техники:

$$S_0 = \frac{S_n \cdot U}{S_n + U},$$

т.е.

$$S_0 = \frac{1 \cdot 1}{1+1} \approx 0,5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Коэффициент использования определяется отношением

$$K_{\text{и}} = \frac{S_0}{S_{\text{н}}} = \frac{0,5}{1} = 0,5$$

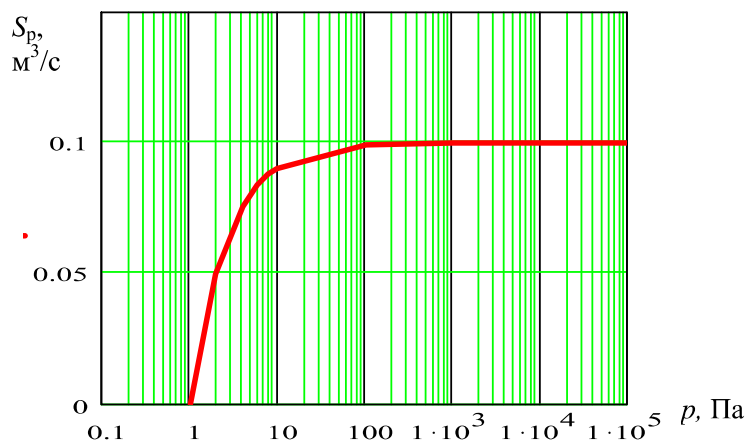
Тема: «Выбор вакуумных насосов»

1) Рассчитать зависимость быстроты действия механического насоса от давления газа, если максимальная быстрота действия насоса $S_{\text{max}} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ и $p_{\text{пр}} = 1 \text{ Па}$.

Решение: зависимость рассчитывается по формуле:

$$S_p = S_{\text{max}} \left(1 - \frac{p_{\text{пр}}}{p} \right),$$

где p – давление, для которого рассчитывается скорость откачки. Зависимость рассчитывается для всего диапазона: от давления запуска p_3 до предельного давления $p_{\text{пр}}$. Механический насос может начинать откачку с атмосферного давления, т.е. $p_3 = 10^5 \text{ Па}$. Результаты расчетов представлены на рисунке. При построении зависимости необходимо по оси абсцисс давление представлять в логарифмической координате.



Вывод: Из зависимости видно, что скорость откачки насоса при предельном давлении равна нулю. Диапазон давлений газа, когда скорость откачки остается постоянной и максимальной, является рабочим.

2) Выбрать вакуумный насос для установившегося режима откачки, если требуется обеспечить скорость откачки рабочего объема $0,1 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении $5 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ через трубопровод диаметром $0,2 \text{ м}$.

Решение: Рассчитываем граничное значение давления для молекулярного режима, используя критерий Кнудсена

$$p_m \cdot d \leq 0,02 \text{ Па} \quad p_m = \frac{0,02}{0,2} = 0,1 \text{ Па}.$$

Следовательно, рабочее давление $5 \cdot 10^{-4}$ Па меньше, чем 0,1 Па, т.е. будет иметь место молекулярный режим течения газа. Рассчитываем проводимость трубопровода в этом режиме. Принимаем, что длина трубопровода в два раза больше его диаметра.

$$U_m = 121 \frac{d^3}{l} = 121 \frac{(2 \cdot 10^{-1})^3}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-1}} = 2,42 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Используя основное уравнение вакуумной техники, рассчитаем требуемое значение быстроты действия насоса.

$$S_n = \frac{S_0 \cdot U}{U - S_0} = \frac{0,1 \cdot 2,42}{2,42 - 0,1} = 0,1043 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Теперь определяем коэффициент использования насоса

$$K_u = \frac{S_0}{S_n} = \frac{0,1}{0,1043} = 0,96.$$

По справочнику выбираем насос, исходя из двух условий:

1) $S_n \geq 0,104 \text{ м}^3 / \text{с}.$

2) $p_{\text{пр}} \leq K_u p = 0,96 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$

Далее по справочнику выбираем насос, который обеспечивал бы $S_n \geq 0,104 \text{ м}^3 / \text{с}$ и давление $p_{\text{пр}} \leq 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}.$

3) Выбрать вакуумный насос для неустановившегося режима откачки рабочего объема $V = 0,5 \text{ м}^3$ от давления 1 Па до 10^{-4} Па за время 230 с при $K_u = 0,5$ и $p_{\text{пр}} = 10^{-5} \text{ Па}.$

Решение: Принимаем, что при относительно низких давлениях имеет место молекулярный режим течения газа. В этом случае быстрота действия насоса рассчитывается по формуле (3.27)

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V}{K_u (t_2 - t_1)} \cdot \lg \left(\frac{p_1 - p_{\text{пр}}}{p_2 - p_{\text{пр}}} \right) = \frac{2,3 \cdot 0,5}{0,5 \cdot 230} \cdot \lg \left(\frac{1 - 10^{-5}}{10^{-4} - 10^{-5}} \right) = 0,04 \text{ м}^3 / \text{с}$$

4) Выбрать насос для откачки камеры объемом $0,5 \text{ м}^3$ через трубопровод диаметром 0,1 м и длиной 0,2 м от атмосферного давления до 20 Па за время 300 с.

Решение: Воспользуемся критерием Кнудсена для определения режима течения газа

$$p_g \cdot d \geq 1,33 \text{ Па}; \quad p_g = \frac{1,33}{0,1} = 13,3 \text{ Па}$$

Таким образом, режим будет вязкостный. Быстрота действия насоса рассчитывается по формуле. Для неустановившегося режима проводимость трубопровода для вязкостного режима рассчитывается по формуле:

$$U_v = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot \bar{p} = C \cdot \bar{p}$$

Отсюда константа $C = 1,36 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,1^4}{0,2} = 0,68 \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{Па}}$

$$S_{\text{н}} = \frac{2,3 \cdot V \cdot \lg p_1 / p_2}{(t_2 - t_1) - \frac{V}{C} \cdot \left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_1} \right)} = \frac{2,3 \cdot 0,5 \cdot \lg(10^5 / 20)}{300 - \frac{0,5}{0,68} \cdot \left(\frac{1}{20} - \frac{1}{10^5} \right)} = 0,014 \text{ м}^3 / \text{с}$$

Тема: «Паромасляный диффузионный насос»

1) Рассчитать степень сжатия.

Степень сжатия газа в струе пара есть отношение выпускного давления к предельному давлению и описывается уравнением:

$$\frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp\left(\frac{v_{\text{п}} \cdot L}{D_{\text{гп}}}\right),$$

где $v_{\text{п}}$ – скорость струи пара;

L – длина струи пара;

$D_{\text{гп}}$ – коэффициент диффузии газа через струю пара на впускную сторону насоса.

Для случая, когда давление пара $p_{\text{п}}$ значительно больше давления газа в струе пара, коэффициент диффузии может быть определен:

$$D_{\text{гп}} = \frac{D_0}{n_{\text{п}}},$$

где D_0 – постоянная взаимной диффузии.

$$D_0 = \frac{3}{8\sqrt{2\pi}} \left(RT_{\text{п}} \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} \frac{1}{\left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right)^2},$$

где σ_1, σ_2 – диаметр молекул соответственно газа и пара;

M_1, M_2 – молекулярный вес соответственно газа и пара;

R – универсальная газовая постоянная;

$T_{\text{п}}$ – температура пара.

Учитывая, что

$$n_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}}}{k \cdot T_{\text{п}}},$$

получаем

$$D_{\text{гп}} = 85,1 \cdot 10^{-23} \left(\frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} \right)^{1/2} \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)^{-2} \cdot T_{\text{п}}^{3/2} \cdot p_{\text{п}}^{-1},$$

где $p_{\text{п}}$ – давление пара в струе.

Для масла ВМ-1 $M_2 = 450$ и $\sigma_2 = 10 \cdot 10^{-10}$ м. При номинальной мощности подогревателя насоса температура масла и пара равны 473 К; давление пара масла при этом соответствует 66 Па, а скорость пара $v_{\text{п}} = 200$ м/с. Для воздуха $M_1 = 29$, $\sigma_1 = 3,6 \cdot 10^{-10}$ м.

Коэффициент диффузии воздуха в струе пара масла будет составлять

$$D_{\text{пр}} = 85,1 \cdot 10^{-23} \left[\frac{10^{-3} (29 + 450)}{10^{-6} \cdot 29 \cdot 450} \right]^{1/2} \left[10^{-10} (3,6 + 10) \right]^{-2} \cdot 473^{3/2} \cdot 66^{-1} = 0,434$$

Степень сжатия рассчитывается при длине струи $L = (2 - 5) \cdot 10^{-2}$ м.

$$\text{Тогда } \frac{p_{\text{вып}}}{p_{\text{пр}}} = \exp\left(\frac{200 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{0,434}\right) \approx 10^4$$

3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ АУДИТОРНЫХ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Занятие № 1

- 1) Определить основные параметры механических насосов.
- 2) Рассчитать и построить зависимость быстроты действия выбранного насоса от давления на входе насоса.

Литература: [1,2].

Занятие № 2

- 1) Рассчитать режимы течения газа в рабочем диапазоне давлений для заданного диаметра трубопровода.
- 2) Рассчитать эффективную скорость откачки.
- 3) Определить коэффициент использования насоса в зависимости от проводимости трубопровода.

Литература [1,2].

Занятие № 3

- 1) Нарисовать компоновочную схему вакуумной установки для заданного давления газа.
- 2) Рассчитать выбор вакуумных насосов.

Литература [1,2].

Занятие № 4

1. Рассчитать скорость и время осаждения пленок. Сделать выводы о практической пригодности режимов. Принять: площадь точечных испарителей $S = 0,3 - 0,6 \text{ см}^2$, площадь поверхностных испарителей $S = 1 - 3 \text{ см}^2$. Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

2. Рассчитать разброс толщины пленки на стандартной подложке (60 x 48 мм). Рассчитать степень загрязнения пленок в центре и на краю стандартной подложки. Принять, что остаточная атмосфера – азот, $p_r = 10^{-2}$ Па, $T_r = 300$ К. Сделать выводы о практической пригодности режимов. Варианты заданий приведены в таблице 2.1.

Литература [3, 4, 5].

Таблица 2.1 - Варианты заданий по теме 2.1

Вариант	Материал	Плотность γ , $\times 10^3$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Масса, а.е.м.	Температура испарения, К	Коэффициенты		Тип испарителя	h, см	d, мкм
					A	B			
1	Ag	10,49	107,868	1320	10,78	14090	Поверх.	12	0,5
2	Al	2,7	26,98154	1423	11,11	15630	Точеч.	14	0,5
3	Cu	8,96	63,546	1546	10,84	16580	Поверх.	13	1,0
4	Mo	10,2	95,94	2800	10,92	30310	Точеч.	12	0,1
5	Au	19,32	196,9665	1738	10,77	18520	Поверх.	10	0,6
6	Pt	21,5	195,09	2360	11,75	27500	Точеч.	10	0,6
7	Ti	4,52	47,9	1832	11,1	20110	Поверх.	10	0,2
8	W	19,3	183,85	3580	11,36	40260	Точеч.	13	0,1
9	Ni	8,9	58,71	1780	11,67	20600	Точеч.	15	0,2
10	Cr	7,19	51,996	1478	12,0	17560	Поверх.	15	0,05
11	Si	2,42	28,086	1615	12,32	19700	Поверх.	12	0,5
12	Ta	16,6	180,947	3340	12,12	40210	Точеч.	12	0,1
13	Ge	5,32	72,59	1520	10,12	15150	Поверх.	13	0,5
14	Cd	8,65	112,41	538	10,9	5800	Поверх.	14	0,1
15	Fe	7,86	55,847	1720	12,53	21960	Поверх.	12	0,5
16	Zn	6,5	65,38	616	11,06	6740	Поверх.	14	0,3

Занятие № 5

1. Рассчитать скорость осаждения и время напыления пленок ионно-плазменным распылением. Сделать анализ практической пригодности полученных результатов по времени осаждения пленок. Предложить практическую реализацию метода получения пленок. Варианты заданий приведены в таблице 2.2. Принять: расстояние от мишени до подложки $h = 5 - 7$ см.

Литература [3, 4, 6].

Таблица 2.2 - Варианты заданий по теме 2.3

№	Ион	Мишень	Энергия иона E, кэВ	Плотность тока Мишени j, А/м ²	Толщина пленки d, мкм	Диаметр мишени d _м , мм	Размер подложки, мм	Коэффициент распыления, ат/ион
1.	Ar	магний	2	10	0,1	100	Ø100	2,8
2.	Ar	титан	1	5	0,2	150	Ø100	1,83
3.	Ar	ванадий	5	10	0,2	100	60x48	2,15

4.	Ar	медь	5	5	1,0	150	Ø200	2,65
5.	Ar	молибд	5	5	0,2	80	60x48	1,68
6.	Ar	серебро	5	4	0,5	70	Ø 70	4,5
7.	O ₂	тантал	4	10	0,2	120	Ø100	1,6
8.	Ar	вольфр	5	1	0,2	60	Ø 70	1,4
9.	Ar	золото	2	10	0,5	70	Ø 100	2,8
10.	Ar	ниобий	2	2	0,3	100	Ø 150	1,07
11.	Ar	тантал	1	5	0,4	120	Ø 150	1,18
12.	Ar	кремний	5	5	1,0	100	60x48	2,6
13.	Ar	медь	10	5	1,2	150	Ø 200	7,7
14.	Ar	алюмин	5	10	0,9	150	Ø 100	1,35
15.	Ar	кремний	1	5	0,9	100	Ø 150	1,81
16.	Ar	золото	5	10	0,7	70	Ø 100	4,1

4 ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №1

Вариант № 1

1) Основное уравнение вакуумной техники. На что влияет проводимость трубопроводов и от чего она зависит?

2) Криоконденсационные насосы. Как зависят характеристики насосов от температуры криопанели?

Вариант № 2

1) Показать необходимость высокого вакуума при напылении пленок. Определить границы по давлению.

2) Механические насосы. Основные характеристики.

Вариант № 3

1) Что такое быстрота действия насосов? Как ее определить в зависимости от режимов течения газов по трубопроводам?

2) Зависимость быстроты действия паромасляного диффузионного насоса от впускного давления.

Вариант № 4

1) Объяснить принцип молекулярной откачки. Пределы работы молекулярных насосов по давлению.

2) Характеристики диффузионных насосов. Какие факторы и почему влияют на предельное давление этих насосов?

Вариант № 5

1) Объяснить принцип объемной откачки. Чем определяется величина предельного давления?

2) Принцип работы одноступенчатого диффузионного насоса. Что будет, если в насосе использовать в качестве рабочей жидкости ртуть или воду?

Вариант № 6

- 1) Основное уравнение вакуумной техники. Объяснить, что такое коэффициент использования насоса.
- 2) Способ получения высокого вакуума с помощью криоадсорбционных насосов.

Вариант № 7

- 1) Как произвести выбор вакуумного насоса в установившемся режиме?
- 2) Механические масляные насосы. Проанализировать влияние вредного пространства на предельное давление. Пути решения этой проблемы.

Вариант № 8

- 1) Основное уравнение вакуумной техники. На что влияет проводимость трубопроводов и от чего она зависит?
- 2) Механические насосы. Основные характеристики..

Вариант № 9

- 1) Что такое эффективная скорость откачки? Как ее определить в зависимости от режимов течения газов по трубопроводам?
- 2) Уравнение сплошности потока газа.

Вариант № 10

- 1) Как произвести выбор вакуумного насоса в установившемся режиме?
- 2) Ионно-сорбционная откачка. Какими параметрами определяется скорость откачки этих насосов?

Вариант 11

- 1) Как произвести выбор насоса, исходя из уравнения сплошности потока?
- 2) Паромасляные диффузионные насосы. Что такое селективность откачки?

Вариант № 12

- 1) Принципы криогенной откачки.
- 2) Как определить предельное давление по кривой откачки?

Вариант № 13

- 1) Дать определения основных параметров насосов.
- 2) Молекулярные насосы. Чем определяется скорость откачки этих насосов?

Вариант № 14

- 1) Что такое быстрота действия насоса и эффективная скорость откачки объёма? Представить на одном графике зависимости этих параметров от давления.
- 2) Принцип криоконденсационной откачки.

5. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ №2

Вариант 1

1. Что определяет давление насыщенных паров металлов при термическом испарении в вакууме?
2. Модель ионного распыления. Какая минимальная энергия необходима для распыления?

Вариант 2

1. Чем определяется количество вещества, испаренного в угол $d\omega$ для точечного испарителя?
2. Зависимость коэффициента распыления от энергии ионов.

Вариант 3

1. Как зависит скорость конденсации при термическом испарении от расстояния испаритель-подложка?
2. Получение пленок из тугоплавких металлов ионно-плазменным распылением. Скорость распыления.

Вариант 4

1. Особенности испарений соединений и сплавов при термическом испарении.
2. Модель ионного распыления. Какой атом из каскада смещенных способен стать распыленным?

Вариант 5

1. Как изменится время напыления с увеличением температуры испарения?
2. Модель ионного распыления. Коэффициент распыления с увеличением температуры мишени увеличивается, уменьшается или не изменяется?

Вариант 6

1. Рассмотреть процесс испарения путем нагрева ускоренными электронами.
2. Скорость осаждения пленок при ионно-плазменном распылении. Параметры, с помощью которых можно управлять временем напыления пленок.

Вариант 7

1. Чем определяется количество вещества, испаренного в угол $d\omega$ для поверхностного испарителя?
2. Требования к вакууму в ионно-плазменных методах получения нанослоев.

Вариант 8

1. Объяснить зависимость скорости испарения от температуры испарения.

2. Рассмотреть процесс распыления в тлеющем разряде.

Вариант 9

1. Типы резистивных испарителей с косвенным нагревом.
2. Что такое коэффициент распыления?

Вариант 10

1. В каком случае рекомендуется метод «взрывного испарения» и почему?
2. Получение плёнок тантала при ионно-плазменном распылении.

Вариант 11

1. Что нужно сделать, чтобы уменьшить время напыления пленки при термическом испарении?
2. Плазменные процессы в диодной системе распыления.

Вариант 12

1. Метод одновременного испарения из двух испарителей.
2. Сформулировать требования к вакууму при термическом испарении.

Вариант 13

1. Разброс толщины плёнок по подложке при термическом испарении в вакууме.
2. Зачем нужны электронные испарители?

Вариант 14

1. Распыление материалов при введении активного газа (реактивное распыление).
2. Что такое «условная» температура испарения?

Вариант 15

- 1) Плазменные методы получения нанослоёв сложных веществ.
- 2) С помощью каких параметров можно уменьшить время напыления при термическом испарении в вакууме?

6. ЛИТЕРАТУРА

1. Т.И.Данилина, А.С.Макрушин Вакуумная техника.: Томск: ТУСУР, 2007.- 96 с.
2. Л.Н.Розанов. Вакуумная техника.- М.: ВШ, 1990.-320 с.
3. Т.И.Данилина Технология тонкопленочных микросхем. – Уч. пособие. Томск: ТУСУР,2007. – 151 с.
4. Т.И.Данилина, С.В.Смирнов Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС.-Томск: ТУСУР, 2000.- 140с.
5. Технология тонких плёнок. Справочник под ред.Л.Майссела, Р.Глэнга.- М.: Сов.радио, 1977, Т.1.-662 с.
6. Т.И.Данилина Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур.-Томск.:ТУСУР, 2012.- 90 с. [электронный ресурс] - адрес:
http://miel.tusur.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=97&Itemid=92

Значение основных параметров наиболее важных газов

Газ	$M_0, \text{г·моль}^{-1}$	$\sigma, \text{нм}$	Среднеарифметическая скорость $\bar{v}_{\text{ар}}$ (273 К), 10^4 см·с^{-1}	Коэффициент диффузии D (при 273 К, атм. давление)		Длина свободного пробега λ_0 , (при 133 Па, 273 К), 10^3 см
				собственной, $\text{см}^2 \text{ с}^{-1}$	взаимной (газ/воздух), $\text{см}^2 \text{ с}^{-1}$	
He	4	0,22	12,00	1,6	0,57	13
Ne	20	0,27	5,40	0,45	0,26	8,5
Ar	40	0,36	3,82	0,2	0,15	4,9
Kr	83	0,42	2,65	0,09	0,12	3,7
Xe	130	0,49	2,12	0,05	0,11	2,6
Hg	201	0,44	1,72	0,025	0,1	3,4
H ₂	2	0,27	16,9	1,27	0,66	8,6
N ₂	28	0,38	4,55	0,18	0,18	4,6
CO	28	0,38	4,55	0,16	0,175	4,6
воздух	29	0,375	4,57	0,18	0,18	4,5
O ₂	32	0,365	4,25	0,18	0,18	4,8
H ₂ O	18	0,465	5,77	0,14	0,16	3
CO ₂	44	0,46	3,62	0,1	0,135	3

Основные физические постоянные

Постоянные	Символ	Значение	Единицы СИ
Элементарный заряд	e	1,6	10^{-19} Кл
Число Авогадро	N_A	6,02	10^{23} моль ⁻¹
Масса покоя электрона	m_e	9,1	10^{-31} кг
Постоянная Планка	h	6,62	10^{-34} Дж·с
Атомная единица массы	$a.е.м.$	1,66	10^{-27} кг
Газовая постоянная	R	8,3	Дж · моль ⁻¹ град ⁻¹
Постоянная Больцмана	k	1,38	10^{-23} Дж · град ⁻¹
Первый радиус Бора	a_0	5,29	10^{-11} м
Диэлектрическая проницаемость вакуума	ϵ_0	8,85	10^{-12} Ф · м ⁻¹

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ИЗМЕРЕНИЯ

$$1 \text{ Дж} = 0,24 \text{ кал}; 1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,83 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$$

$$1 \text{ м} = 10^{10} \text{ \AA} = 10^9 \text{ нм} = 10^6 \text{ мкм} = 10^3 \text{ мм} = 10^2 \text{ см}$$

$$\text{Заряд электрона } e = 4,8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\text{Газовая постоянная } R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = 1,987 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$\text{Постоянная Больцмана } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ эВ} \cdot \text{К}^{-1}$$

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

Пе ри од ы	Ря ды	Группы элементов									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	I	1 H 1,008							2 He 4,0		
2	II	3 Li 6,94	4 Be 9,01	5 B 10,81	6 C 12,0	7 N 14,01	8 O 16,0	9 F 19,0	10 Ne 20,18		
3	III	11 Na 23	12 Mg 24,30	13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97	16 S 32,06	17 Cl 35,45	18 Ar 40,0		
4	IV	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,94	24 Cr 52,0	25 Mn 54,9	26 Fe 55,8	27 Co 58,9	28 Ni 58,7
	V	29 Cu 63,55	30 Zn 65,38	31 Ga 69,72	32 Ge 72,5	33 As 74,92	34 Se 79,0	35 Br 79,9	36 Kr 83,8		
5	VI	37 Rb 85,5	38 Sr 87,6	39 Y 88,9	40 Zr 91,2	41 Nb 92,9	42 Mo 96,0	43 Tc 98,9	44 Ru 101,0	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4
	VI I	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 In 114,8	50 Sn 118,8	51 Sb 121,8	52 Te 127,6	53 I 126,9	54 Xe 131,3		
6	VI II	55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	La- Lu	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,0
	IX	79 Au 197	80 Hg 200,6	81 Tl 204,3	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)		
7	X	87 Fr (223)	88 Ra 226	Ac- (Lr)	104 Ku (261)	105 Ns (261)					

Параметры металлов и полупроводников

Материал	Плотность, $\gamma, \cdot 10^3,$ $\text{кг}/\text{м}^3$	Атом-ная плот- ность $N_0, \cdot 10^{28},$ $\text{атом}/\text{м}^3$	Услов-ная темпера-тура испарен-ия, К	Коэффициенты		Энергия сублимации , $E_{\text{суб}}, \text{ЭВ}$
				A	B	
Ag	10,49	5,85	1320	10,78	14090	2,7
Al	2,7	6,04	1423	11,11	15630	3,26
Cu	8,96	8,52	1546	10,84	16580	3,56
Mo	10,2	6,39	2800	10,92	30310	6,9
Au	19,32	5,90	1738	10,77	18520	3,92
Pt	21,5	6,61	2360	11,75	27500	5,56
Ti	4,52	5,66	1832	11,1	20110	4,34
W	19,3	6,09	3580	11,36	40260	8,76
Ni	8,9	9,03	1780	11,67	20600	4,41
Cr	7,19	7,64	1478	12,0	17560	3,68
Si	2,42	5,04	1615	12,32	19700	3,91
Ta	16,6	5,52	3340	12,12	40210	8,7
Ge	5,32	4,53	1520	10,12	15150	3,77
Cd	8,65		538	10,9	5800	
Fe	7,86	8,48	1720	12,53	21960	4,15
Zn	6,5		616	11,06	6740	
Be		12,3	1500			3,48
Mg	1,74	4,31	712			1,59
Si	2,42	5,04	1015			3,91
V	6,11	6,63	2120			3,7
Mn	1,76	8,01	1210			3,15
Nb	8,57	5,45	2930			7,5