

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Национальный исследовательский университет

Учебно-научный и инновационный комплекс

"Физические основы информационно-телекоммуникационных систем"

Основная образовательная программа

011800 «Радиофизика», профили «Электроника, микро- и наноэлектроника» и «Квантовая радиофизика и квантовая электроника», квалификация (степень) бакалавр

Учебно-методический комплекс по дисциплине

«Учебно-научный эксперимент»

Основная образовательная программа

011800 «Радиофизика», магистерская программа «Физическая электроника», квалификация (степень) магистр

Учебно-методический комплекс по дисциплинам

«Физика сверхпроводников» и «Физика магнетизма»

Вдовичев С.Н.

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЫСОКОВАКУУМНОГО
НАПЫЛЕНИЯ И ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР**

Электронное учебно-методическое пособие

Мероприятие 1.2. Совершенствование образовательных технологий, укрепление материально-технической базы учебного процесса

Нижегород
2012

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВЫСОКОВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ И ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР. Вдовичев С.Н. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2012. – 60 с.

В учебно-методическом пособии рассматриваются современные базовые методы нанотехнологий металлической наноэлектроники - напыление в вакууме и вакуумная плазмохимическая обработка тонкопленочных структур. Излагаются основы вакуумной техники, необходимые для работы на современных напылительных установках. Приведены схемы компоновки вакуумных систем и изложены принципы построения вакуумных систем. Изложены современные методы нанесения тонких пленок и основы теории механизма роста пленок напыляемого материала на подложке.

Электронное учебно-методическое пособие предназначено для студентов ННГУ, обучающихся по направлению подготовки 011800.62 «Радиофизика», профиль «Электроника, микро- и наноэлектроника» и профиль «Квантовая радиофизика и квантовая электроника», проходящих курс Учебно-научного эксперимента, и по направлению подготовки 011800.68 «Радиофизика», магистерская программа «Физическая электроника», изучающих курсы «Физика сверхпроводников» и «Физика магнетизма» .

Содержание

Введение	Стр. 4
1. Осаждение тонких пленок материалов на поверхность подложки	Стр. 5
2. Основы вакуумной техники	Стр. 13
3. Основные методы напыления в тонкопленочной технологии	Стр. 41
4. Плазменные методы обработки.	Стр. 51
Приложение	Стр. 55
Литература	Стр. 60

Введение

За последние десятилетия вакуумное напыление стало основным методом создания тонких пленок для использования в науке, областях R&D (Research and Development – исследования и разработки) и промышленности. Для применения в области R&D, особенно при формировании металлических структур (сверхпроводящих, ферромагнитных и других пленок), основным методом изготовления является высоковакуумное напыление пленок. Этот метод изготовления является довольно дорогим по себестоимости, не позволяет изготавливать образцы в большом количестве, но дает возможность гибко и быстро менять условия в которых происходит напыление, менять распыляемые материалы и др. В данном пособии охватываются основы современных вакуумных технологий микроэлектроники - напыление в вакууме и вакуумная плазмохимическая обработка тонкопленочных структур.

Экспериментальная работа будет проводиться на многофункциональном высоковакуумном комплексе «Аврора» (США). Аналогичные установки используются в исследованиях в областях ферромагнетизма, спинтроники и криоэлектроники по всему миру например, IBM (США) Институт нанотехнологий (Испания) и др. В ходе работы предлагается изготовить и исследовать: магнитные свойства тонких ферромагнитных пленок и сверхпроводящие свойства тонких сверхпроводящих пленок различных материалов.

Осаждение тонких пленок материалов на поверхность подложки

Получение высококачественных тонких пленок слоев полупроводников, металлов и диэлектриков является необходимым условием для создания твердотельных приборов любого уровня сложности методами современной планарной технологии.

Свойства тонкой пленки могут существенно отличаться от свойств массивного материала, особенно при толщинах пленки в несколько нанометров. Такие «аномальные» свойства связаны со спецификой структуры тонкой пленки, обусловленной процессами, происходящими во время образования пленки. При вакуумном напылении пленок наиболее понятен механизм образования пленки при конденсации из паровой фазы осаждаемого материала. Конденсация означает переход из газообразного состояния в жидкое или твердое. С точки зрения термодинамики, для того чтобы произошла конденсация необходимо только, чтобы парциальное давление материала пленки в газовой фазе было равно или больше равновесного давления паров этого материала над сконденсированной фазой при данной температуре. Однако это справедливо только, если уже имеет место конденсация на уже сконденсированный материал пленки или на подложку из того же материала. Чаще всего пленка материала отличается от подложки, например, материалы пленки и подложки имеют различные периоды кристаллической решетки. В этом случае необходимо рассматривать еще одну фазу, адсорбированную, в которой атомы пара уже адсорбированы на подложку, но не связаны между собой. Адсорбция (притяжение) подложкой атомов материала обусловлено наличием энергии связи между атомом и кристаллической решетки подложки. Атомы вещества или молекулы пара вещества долетая до подложки могут адсорбироваться и прочно закрепиться на поверхности подложки, мгновенно отразиться или испариться через некоторое время. Обычно

атомы попадают на подложку с высокими энергиями (много больше kT). Благодаря этому, атомы обладают большой поверхностной подвижностью, интенсивно мигрируют по подложке, при этом теряя энергию. Конденсация начинается с соединения нескольких адсорбированных атомов в небольшие скопления, которые называются зародышевыми центрами, или зародышами, а процесс их образования – зародышеобразованием. Для этого как минимум необходимо, чтобы поток осаждаемых атомов превосходил поток реиспаряющихся атомов с подложки. Так как маленькие частицы всегда обладают более высоким давлением паров, чем массивный материал при тех же условиях (уравнение Гиббса-Томсона), для того чтобы произошло образование зародыша необходимо степень пресыщения больше единицы. Когда зародыш достигает критического размера, процесс роста зародыша становится необратимым. Процесс увеличения зародышевого состояния центра и образование, в конце концов, однородной пленки называется ростом пленки. Часто образование зародышей и рост происходят одновременно в процессе образования пленки. В данном пособии мы не будем касаться теории роста пленок на поверхности подложки. Отметим, что механизм роста определяется балансом энергии поверхности подложки, осаждаемого материала, энергией границы материал-подложка и энергией упругих напряжений в растущей пленке. В русской литературе часто вместо термина «адсорбированный атом» используют сокращенное «адатом», которое и будет дальше использоваться.

Из теории зародышеобразования [1], подтверждаемой экспериментальными результатами, следует последовательность этапов образования зародышей и роста пленки вплоть до образования сплошной пленки такова:

1. Образование адсорбированных атомов
2. Образование субкритических зародышей разного размера

3. Образование зародышей критического размера (этап зародышеобразования).

4. Рост этих зародышей до сверхкритических размеров с результирующим обеднением адатомами зон захвата вокруг зародышей (такой процесс называется коалесценция)

5. Конкурирующим процессом на этапе 4 является образование критических зародышей на площадях не обедненных адатомами.

6. Зародыши соприкасаются друг с другом, с тем чтобы образовать новый островок, занимающий площадь меньше, чем сумма площадей двух начальных зародышей; это приводит к увеличению свободной поверхности подложки.

Схема стадий роста пленки на подложке представлена на рис.1. Можно отметить, что процесс коалесценции (п.4) характерен для эпитаксиального роста пленок (когда на поверхности кристаллического материала растет другой кристаллической материал). Для такого процесса роста характерны высокие температуры подложки, медленная скорость осаждения, более глубокий вакуум при осаждении материала.

В случае отсутствия процесса коалесценции (п.5) зародыши срастаются в островки, имеющие кристаллическую огранку. Далее островки срастаясь, образуют мостики через каналы, поверхность подложки начинает заполняться, но в ней присутствуют дырки, которые постепенно зарастают. Таким образом формируется поликристаллическая пленка. Между зернами (кристалликами пленки) присутствуют и другие фазы, аморфный материал, дефекты. Если размер островков, из которых состоит пленка составляют от одного до нескольких десятков нанометров, то подобную пленку можно называть нанокристаллической. Для некоторых тугоплавких материалов (V, W, Mo, Ta) скопление двух адатомов уже считается зародышем. (При наличии 10-100 адатомов начинает формироваться кристаллическая решетка материала).

При осаждении таких материалов возникает большое число зародышей и мелкозернистая пленка. У более легкоплавких материалов (Mg, Zn) устойчивы зародыши с большим размером, в результате образуется более крупнозернистая пленка. Формирование поликристаллических пленок характерно для процессов магнетронного напыления, рассматриваемых в данном пособии. Нагрев подложки должен приводить к укрупнению кристалликов пленки.

В работе [2] приведены характерные толщины для каждого из этапов роста пленки, на примере Au, см. таблицу 1.

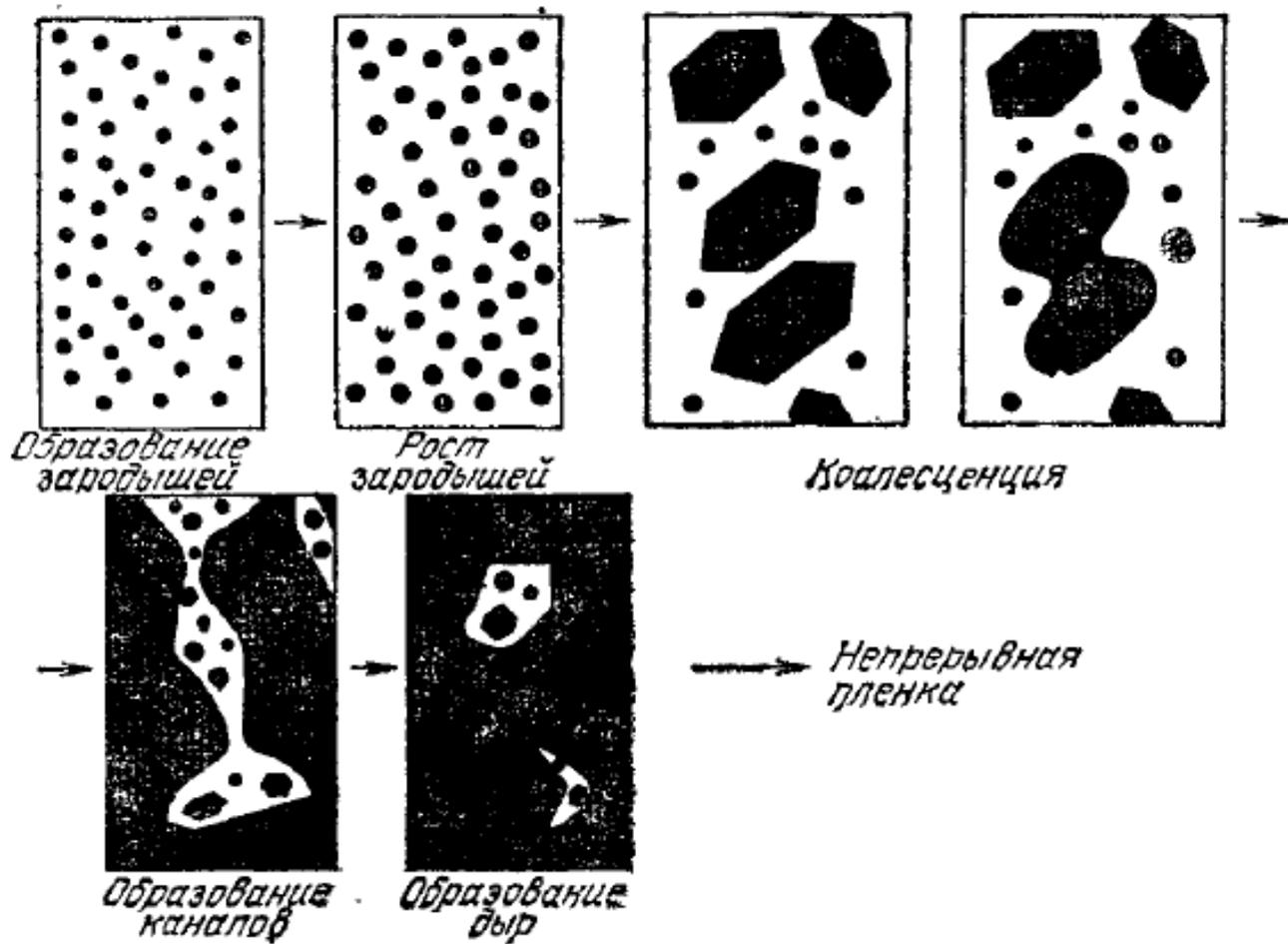


Рис.1 Схема стадий роста пленки, из работы [1].

Таблица 1.

Пример этапов роста пленки золота в зависимости от толщины [2].

Толщина, Å	Этапы роста пленки
0 ÷ 30	Появление зародышей
30 ÷ 200	Коалесценция зародышей и островков
200 ÷ 350	Образование сетчатой структуры
350 ÷ 450	Образование пленки с каналами и дырками
Свыше 450	Формирование сплошной пленки

Подложки для высоковакуумного напыления

Для роста пленок важна подложка и ее поверхность, на которую будет осаждаться материал.

Наиболее часто используются монокристаллические подложки кремния и сапфира. Подобные монокристаллические подложки получают из больших кристаллов посредством их разрезания на пластины с необходимой кристаллографической ориентацией. Такие подложки часто используются для устройств микроэлектроники и в R&D исследованиях. Для эпитаксиального роста необходимо подбирать подложку с кристаллической решеткой наиболее близкой к значению решетки осаждаемого материала. Наиболее распространены плоские подложки в виде диска с толщиной 0.2-0.8 мкм и диаметром 50-100 мм (2"-4")

Также для осаждения часто используются стеклянные подложки. Наиболее распространенные плавный кварц и алюмосиликатные подложки. Их популярность обусловлена условной дешевизной, простотой в обращении.

К подложкам предъявляется ряд требований, часто обусловленных их конечным применением. Выделим некоторые из них.

1. Плоскостность – стороны подложки должны быть параллельны друг другу. Это важно для проведения процессов литографии (особенно электронной), уменьшения температурных градиентов при тепловой обработке. Если у подложки присутствует изгиб – то это делает невозможным формирование плоских зеркал как оптического так и рентгеновского диапазона длин волн.

2. Отсутствие трещин пор и т.д. – для исключения разрывов в формируемой пленки, особенно для литографии и при формировании элементов с пропусканием тока. Также в любых дефектах поверхности неконтролируемо накапливается грязь.

3. Шероховатость подложки. При осаждении сплошных пленок (начиная с толщин от единиц нанометров), очевидно, что величина шероховатость

границы и перепад высот в рельефе поверхности должны быть существенно ниже толщины пленки. Также шероховатость поверхности подложки может существенно влиять на повторяемость результатов.

4. Конечные применения формируемых структур могут накладывать ограничения на значение диэлектрической постоянной подложки (электроизоляция наносимой пленки от подложки, например, для предотвращения шунтирования подложкой при пропускании тока; наличие поглощения СВЧ сигналов и др.), стойкость к химическим реагентам (при проведении литографии), оптимальная теплопроводность (для отвода тепла или наоборот, в зависимости от задач) и т.д.

Для серийного производства большого количества образцов появляется еще требование к низкой стоимости.

В научно-исследовательских задачах обычно всем условиям удовлетворяют монокристаллические подложки кремния (проводящие) или подложки сапфира (диэлектрические). При этом нужно помнить, что чаще всего пленка осаждаемого материала будет находиться в напряжении, что может приводить к отслоению материала, особенно при различных механических или тепловых обработках.

Основы вакуумной техники

Качество изготавливаемых тонких пленок во многом определяется предельным вакуумом в рабочей камере т.е. предельным разрежением. (В технике вакуумом называют состояние газа, когда его давление ниже атмосферного.) Предельный вакуум, создаваемый в вакуумной системе перед распылением мишени является одним из основных параметров, характеризующий чистоту напылительной установки. Это связано с тем, что остаточные газы находящиеся в рабочей камере во многом определяют чистоту осаждаемого материала и соответственно физические свойства изготавливаемых тонких пленок. При осаждении материала мишени на подложку, также происходит осаждение всех веществ, находящихся в остаточной атмосфере рабочей камеры, что приводит к появлению примесей (атомов других веществ) и «грязи», появлению дефектов и даже структурному изменению напыляемой пленки.

Единицей давления в системе СИ является 1 Па (Паскаль). Это давление, создаваемое при воздействии силы 1 Н на площадь 1 м². Измерение давления в Паскалях характерно для российской (советской) вакуумной техники. На западе наиболее распространённой внесистемной единицей давления в вакуумной технике является миллиметр ртутного столба (торр). Под давлением газа 1 мм рт.ст. понимается давление, которое создаёт столбик ртути высотой 1 мм при условии, что плотность ртути равна 13595,1 кг/м³ (при $T = 0$ °С), а земное ускорение соответствует нормальному (9,80665 м/с² на широте 45°): 1 мм рт. ст. = 133,3 Н/м². Соотношение между различными единицами давления даны в табл.

Для удобства приведены единицы измерения давления как для вакуума так и для давлений больше атмосферного, используемых в системах подачи рабочих газов в вакуумные установки.

Соотношение между единицами давления.

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

Понятие о степенях вакуума

Для введения понятия о степенях вакуума удобно необходимо ввести длину свободного пробега в газе. Молекулы газа вследствие частых столкновений и отклонений от первоначального направления не проходят больших расстояний, даже не смотря на большие скорости. Средняя длина свободного пробега λ молекулы газа определяется как среднее расстояние, которое проходит молекула между двумя последовательными столкновениями.

Для наглядного вывода величины λ предположим, что все молекулы газа находятся в покое кроме одной. Если молекула имеет среднюю скорость v то за время dt она пройдет расстояние vdt . Пусть все молекулы имеют один диаметр σ . Тогда молекула столкнется со всеми молекулами, находящимися внутри объема поперечного сечения $\pi\sigma^2$ на длине пути молекулы vdt . Таким образом, объем внутри которого возможны столкновения $\pi\sigma^2 vdt$. Внутри этого объема находится $(N/V) \pi\sigma^2 vdt$ молекул, где N/V число молекул в см^3 . Со всеми этими молекулами столкнется и движущаяся молекула, испытав $(N/V) \pi\sigma^2 v$ соударений. Эти соударения делят путь vdt , проходимый молекулой, на ряд равных отрезков, каждый из которых можно рассматривать как длину свободного пробега

$$\lambda \approx 1 / ((N/V) \pi \sigma^2).$$

Строгий вывод, с учетом относительного движения молекул газа, дает более точное выражение:

$$\lambda = 1 / (2^{-1/2} (N/V) \pi \sigma^2).$$

Если вместо (N/V) подставить давление газа, используя уравнение идеального состояния (уравнение Менделеева-Клайперона) $pV = NkT$, то получим:

$$\lambda = kT / (p \pi \sigma^2 2^{-1/2}).$$

Отсюда видно, что длина свободного пробега обратно пропорционально давлению газа. Опытные данные показывают, что при сохранении (N/V) с увеличением температуры длина свободного пробега увеличивается. Это можно учесть введением дополнительного множителя, определяемого экспериментально:

$$\lambda = 1 / (2^{-1/2} (N/V) \pi \sigma^2 (1 + C/T)),$$

где C – постоянная Сазерленда.

В результате формулу для длины свободного пробега можно записать в виде:

$$\lambda = kT^2 / (p \pi \sigma^2 (T + C) 2^{-1/2}). \quad (1)$$

Средняя длина свободного пробега является статистической величиной, реальная величина свободного пробега меняется от молекулы к молекуле. Распределение длин свободного пробега определяется экспоненциальной функцией.

$$N = N_0 \exp(-l/\lambda) \quad (2)$$

Из (2) следует, что только 37% всех молекул проходят расстояние равной длине свободного пробега без столкновения и порядка 1% всех молекул проходя расстояние по крайней мере 4.5λ .

Формулу (2) можно получить следующим методом. Пусть у нас есть направленный молекулярный поток, содержащий в начальный момент N молекул газа, за счет столкновений с хаотически движущимися молекулами с частотой ν за время dt уменьшается на величину

$$dN = -\nu N dt. \text{ После интегрирования получим}$$

$$N = N_0 e^{-\nu t} = N_0 e^{-l/\lambda}.$$

Для воздуха среднее эффективное сечение составляет $\sigma \approx 62,5 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$.

При $T=293$ К и давлении 1 Па из (1) следует, что $\lambda_1 = 6,7 \cdot 10^{-3}$ м·Па. Длина свободного пробега молекул воздуха при атмосферном давлении 760 торр и температуре 273 К (нормальные условия) соответственно $\lambda = 6 \cdot 10^{-6}$ см = 60 нм. При любом другом давлении

$$\lambda = \lambda_1/p = 6,7 \cdot 10^{-3}/p,$$

где p - в (Па); λ - в (м) или

$$\lambda = 4,5 \cdot 10^{-3}/p, \text{ где } p \text{ в (торр), } \lambda \text{ в (см).}$$

Длины пробегов для различных газов представлены в таблице 3. В таблице 4 приведена средняя длина свободного пути молекул воздуха при 20°C и различных давлениях.

Таблица 3

Средняя длина свободного пробега молекул различных газов при давлении 1 Па, из работы [3]

Газы	$\lambda_1 \cdot 10^3$, м·Па при t, К				Газы	$\lambda_1 \cdot 10^3$, м·Па при t, К			
	600	293	77	4,2		600	293	77	4,2
N ₂	20,8	8,67	1,26	0,0061	H ₂	28,2	12,2	0,197	0,0108
O ₂	16,9	7,02	1,00	0,0047	Хе	10,5	3,93	0,448	0,0017
Ar	16,7	6,79	0,933	0,0042	H ₂ O	13,9	4,38	0,391	0,0013
CO ₂	11,6	4,32	0,492	0,0019	Воздух	16,0	6,72	0,995	0,0048
Ne	30,7	13,9	2,50	0,0165	He	43,6	19,1	3,13	0,0174
Kr	14,1	5,52	0,691	0,0029					

Таблица 4

Средняя длина свободного пробега молекул воздуха при различных газы при 20° С и различных давлениях.

p, Па (тор)	10 ⁵ (760)	10 ¹ (10 ⁻⁰)	10 ⁰ (10 ⁻²)	10 ⁻¹ (10 ⁻³)	10 ⁻² (10 ⁻⁴)	10 ⁻³ (10 ⁻⁵)	10 ⁻⁴ (10 ⁻⁶)
λ , см	7.2 10 ⁻⁶	0,055	0,55	5,5	55	550	550

В вакуумной технике различают четыре основных степени вакуума: низкий, средний, высокий и сверхвысокий. Для количественной оценки вводится число Кнудсена:

$$K_n = \lambda/L,$$

где L — характерный размер вакуумного объема, λ — средняя длина свободного пробега.

Область давлений, когда средняя длина свободного пробега молекул много меньше характеристических размеров вакуумного объема, например, высоты рабочей камеры, отвечает низкому вакууму. Низкий вакуум соответствует $K_n \ll 1$. При этом обмен энергией происходит исключительно между ближайшими молекулами. Такие условия проявляются в виде вязкости газа, а соответствующие процессы называются вязкостными. При напылении в низком вакууме столкновения молекул газа с молекулами распыленного вещества не дают возможности получить на стенках камеры изображение экрана, поставленного на пути молекулярного пучка. Из условия изменения режима течения газа принимают $K_n < 0,005$.

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

В области высокого и сверхвысокого вакуума средняя длина свободного пути молекул много больше размеров вакуумного объема, и молекулы преимущественно сталкиваются со стенками сосуда. В этом случае каждая молекула выступает индивидуально, а процессы в газах называются молекулярными. В высоком вакууме $K_n \gg 1$. В этом случае, при напылении, изображение экрана на пути молекулярного пучка получается отчетливым. Из условия изменения режима течения газа принимают $K_n > 1,5$. Тогда условие существования среднего вакуума можно записать в виде $0,005 < K_n < 1,5$.

Области сверхвысокого вакуума отличаются тем, что за характерное время рабочего процесса не происходит заметного изменения свойств поверхности, связанного с адсорбцией остаточных газов.

Области давлений, обычно соответствующие тому или иному вакууму, представлены на рис.2.

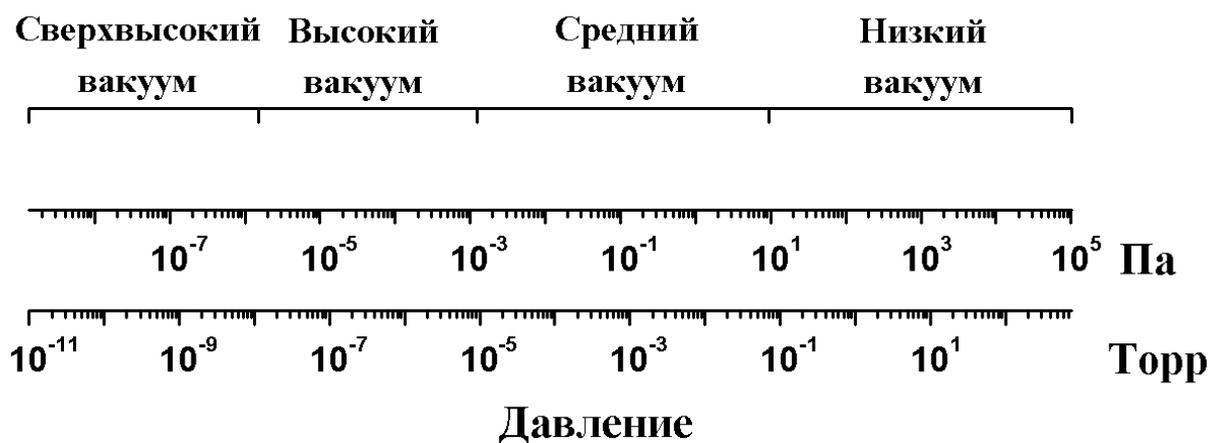


Рис.2 Условное деление областей вакуума

Общая характеристика вакуумных насосов

Для создания в установках требуемой степени разрежения применяют разнообразные вакуумные насосы.

Вакуумные насосы классифицируются по назначению на низковакуумные, средневакуумные, высоковакуумные и сверхвысоковакуумные, а в зависимости от принципа действия - на механические и физико-химические.

По характеру воздействия на откачиваемые газы механические насосы разделяются на объемные и молекулярные. Объемные насосы осуществляют откачку за счет периодического изменения объема рабочей камеры. Конструктивные варианты: поршневые, жидкостно-кольцевые и ротационные. Молекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной быстродвижущейся поверхности. Среди них различают водоструйные, эжекторные, диффузионные, молекулярные с одинаковым направлением движения откачивающей поверхности и молекул газа, турбомолекулярные с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа [4-7].

Объемная откачка (форвакуумные насосы)

В процессе объемной откачки выполняются следующие основные операции: 1) всасывание газа за счет расширения рабочей камеры насоса; 2) уменьшение объема рабочей камеры и сжатие находящегося в ней газа; 3) удаление сжатого газа из рабочей камеры в атмосферу или насос предварительного разрежения. Наиболее распространенной конструктивной схемой объемных насосов являются ротационные.

Ротационные вакуумные насосы имеют несколько конструктивных модификаций. Пластинчато-роторный насос, рис.3. содержит цилиндрический корпус 7 с впускным 4 и выпускным 3 патрубками и эксцентрично расположенный ротор 6, в пазах которого установлены пластины 5. Под действием центробежной силы пластины прижимаются к корпусу, обеспечивая изменение

объема рабочей камеры. Уплотнение зазоров, предотвращающее перетечку газа, осуществляется вакуумным маслом. Предельное давление одноступенчатых роторных насосов достигает 1 Па, двухступенчатых 0,001 Па. Оно определяется кроме газовыделения материалов насоса объемом вредного пространства и давлением насыщенных паров масла.

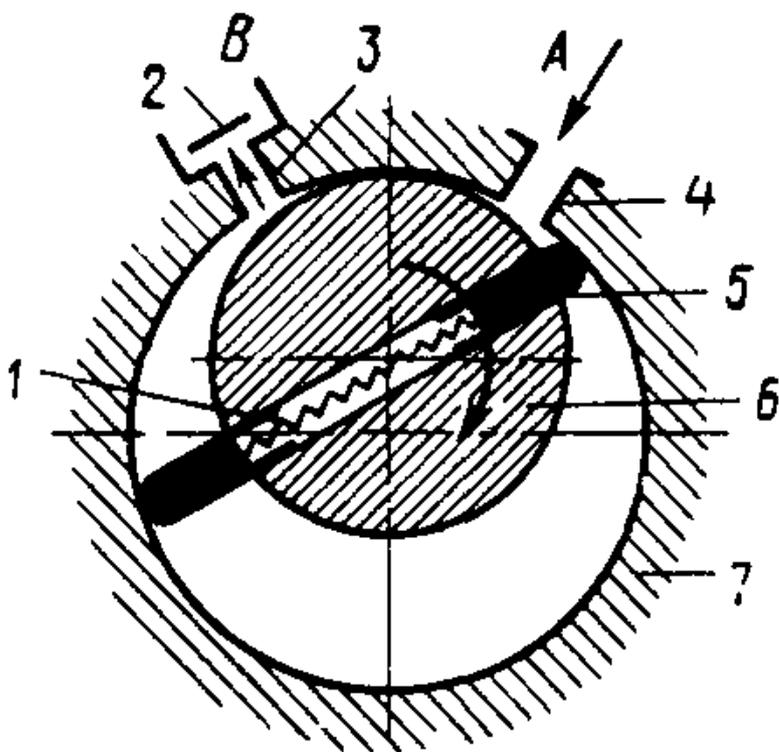


Рис.3 Принцип действия пластинчато-роторного насоса (из [1]). Цилиндрический корпус 7 с впускным 4 и выпускным 3 патрубками и эксцентрично расположенный ротор 6, в пазах которого установлены пластины 5. Для предотвращения заполнения рабочей камеры маслом служит клапан 2. Начальное прижатие пластин к поверхности статора осуществляет пружина 1

Для работы с большой быстротой действия при малых степенях сжатия применяют ротационные вакуумные насосы с обкатываемыми профилями. Вращение роторов обеспечивается синхронизирующей передачей. К таким насосам относятся двухроторные насосы (насосы Рутса), имеющие роторы с леминаскантными профилями, рис.4. За один оборот каждый из роторов дважды перебрасывает объем газа из области высокого вакуума в область высокого давления. В первой позиции, см.рис.4, поступает газ со стороны впускного отверстия, затем часть его захватывается нижним ротором (вторая позиция). В третьей и четвертой фазах этот объем выталкивается в выпускное отверстие. При этом видно, что в позиции 4 верхний ротор также захватил порцию газа, которая будет удалена в следующей четверти цикла. В современных насосах два вращающихся навстречу ротора точно подгоняются к друг другу и работают без какой-либо жидкой или внутренней смазки. В литературе иногда упоминается, что поверхность роторов изготовлена из самосмазывающихся материалов. Раньше было принято считать, что на выходе подобных насосов необходимо создавать разряжение и использовать еще один механический насос. В современных моделях подобных насосов (англ. название *dry lobe type backing pump*) в этом нет необходимости. Двухроторные насосы при тех же габаритах имеют значительно большую быстроты действия, чем пластинчатые. Быстрота действия современных двухроторных насосов лежит в пределах от 5 до 5000 л/с. Предельное давление одноступенчатых насосов 0,5 Па, двухступенчатых 0,05 Па.

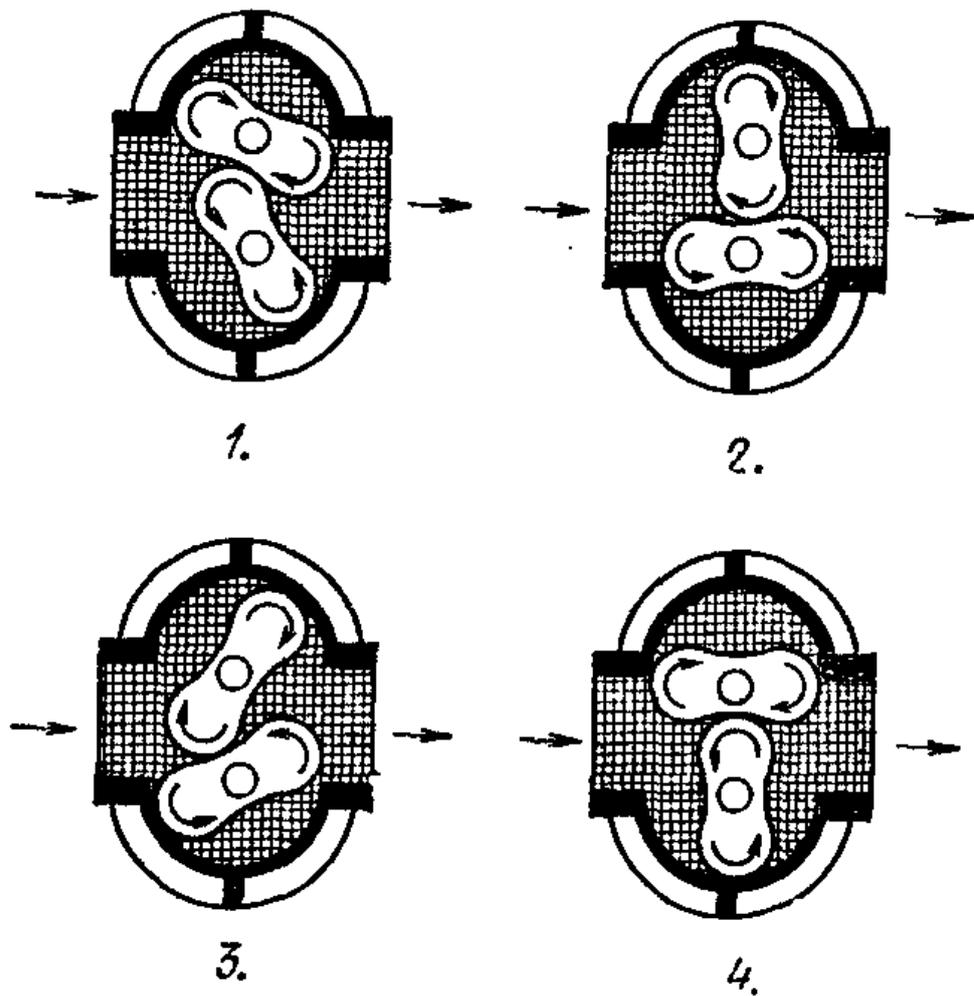


Рис.4 Принцип действия двухроторного насоса.

Высоковакуумные насосы

Для создания высокого вакуума наиболее широко используются 3 типа насосов, 2 из которых относятся к молекулярным насосам и один к физико-химическим.

Турбомолекулярные насосы

Как уже говорилось молекулярные насосы работают за счет передачи молекулам газа количества движения от твердой, жидкой или парообразной быстродвижущейся поверхности.

Наиболее распространены турбомолекулярные насосы с взаимно перпендикулярным движением твердых поверхностей и откачиваемого газа. Теоретическое предельное давление для турбомолекулярных насосов 10^{-10} торр, однако достигается только 10^{-8} - 10^{-9} торр.

Турбомолекулярные насосы с помощью быстровращающихся поверхностей, которые сообщают сталкивающимися с ними молекулами газа тангенциальный импульс, создают поток газа направленный в сторону насоса предварительной откачки. Таким образом, турбомолекулярные насосы сочетают принцип молекулярного увлечения и осевого компрессора. При этом точки на окружности ротора имеют линейные скорости порядка молекулярных (430 м/с). Поэтому вал таких насосов должен вращаться со скоростью 10 000–60 000 об/мин в зависимости от диаметра насоса.

Схема и принцип действия турбомолекулярного насоса изображена на рис.5 В корпусе 2 насоса с вертикальным валом 4 установлены неподвижные статорные диски 3, между которыми вращаются роторные диски 7, закрепленные на роторе 4. В роторных дисках сделаны направленные под углом радиальные прорези. В статорных дисках имеются зеркально расположенные прорези такой же формы, поэтому образуются клиновидные каналы. При быстром вращении роторных дисков относительно статорных молекулы газа, ударяясь о стенки

прорезей, преимущественно движутся в направлениях, указанных стрелками на рис.б. Таким образом, газ последовательно от одной пары дисков к другой, в этом и состоит откачивающее действие турбомолекулярного насоса. В насосе, показанном на рис.а) газ перемещается сверху вниз, от входного фланца к выходному фланцу. При диаметре рабочих дисков порядка 200 мм зазоры между роторным и статорным диском могут составлять порядка 1 мм, что позволяет значительно повысить надежность их работы.

Перепад давления между каждой парой смежных дисков не велик, однако поскольку последовательно работают много дисков, то суммарный коэффициент компрессии насоса достигает значительной величины. В рабочих режимах (при вращении 16 000 об/мин) коэффициент компрессии для водорода 250, для воздуха 10^6 , для паров газов с большой молекулярной массой ($M > 44$) степень сжатия может достигать 10^{15} .

По сравнению со многими другими сверхвысоковакуумными насосами турбомолекулярным насосам присущ ряд преимуществ: постоянная готовность к работе, быстрый (10–15 мин) запуск, нечувствительность к резкому повышению давления (вплоть до атмосферного), широкий диапазон рабочих давлений (10^{-7} – 10^{-1} Па) примерно одинаковая быстрота действия по большинству газов, чрезвычайно высокая степень сжатия (10^{15}) для газов с большой молекулярной массой ($M \geq 44$). Высокая степень сжатия обеспечивает давление углеводородов на входе турбомолекулярного насоса не более 10^{-15} Па, т.е. практически безмаслянный вакуум, при давлении на форвакууме 1–13 Па ($7 \cdot 10^{-3}$ – 0,1 торр), соответствующем остаточному давлению большинства форвакуумных насосов, в том числе с масляным уплотнением.

Большое влияние на характеристики насоса и срок службы оказывает конструкция опорных узлов: на смазываемых подшипниках качения, на магнитных опорах или газовой подушке. Схематическое изображение современного турбомолекулярного насоса приведено на рис.б.

К недостаткам насоса можно отнести слабую откачку по водороду (важно при изготовлении сверхпроводящих пленок ниобия) относительно медленную откачку по кислороду и парам воды.

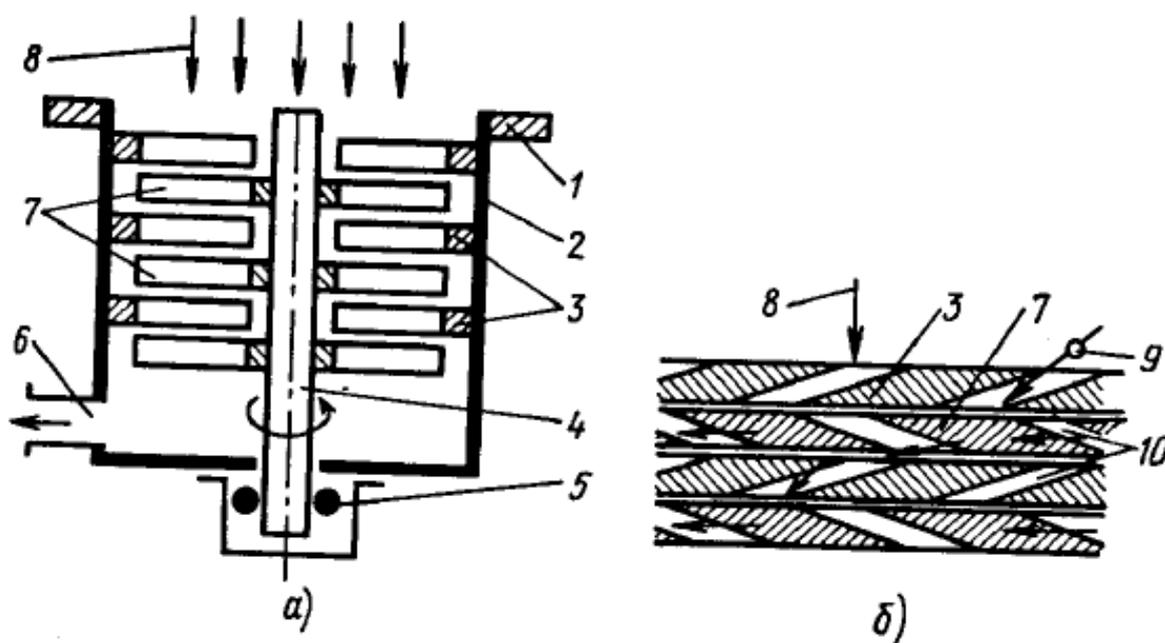


Рис.5 а) Схема турбомолекулярного насоса (ТМН) [1]; б) схема создания молекулярного насоса в ТМН. 1,6 – впускной и выпускной фланцы, 2– корпус, 3 и 7 – статорные и роторные диски, 4 – ротор, 5 подшипник, 8 и 9 – поток и молекула откачиваемого газа, 10 –

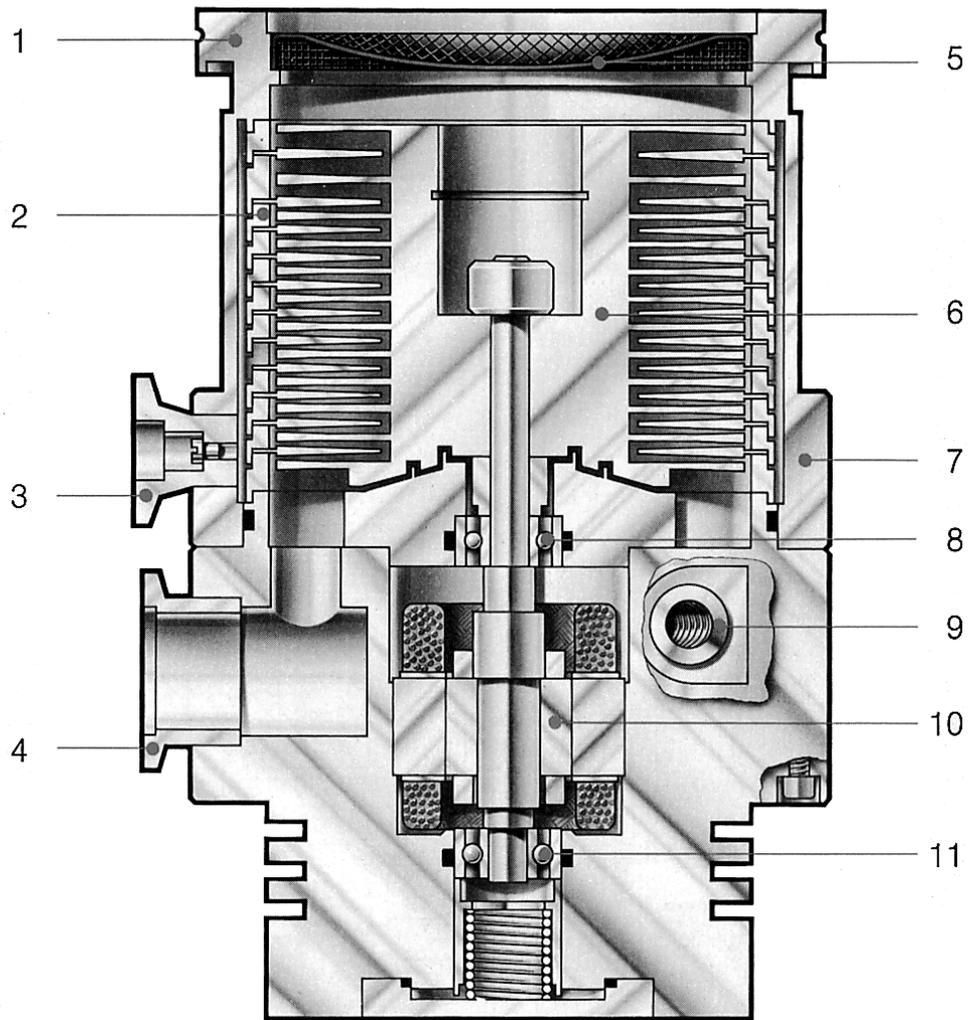


Рис.6 Схематическая диаграмма современного турбомолекулярного насоса в разрезе [7]. 1 – высоковакуумный входной фланец, 2– пластины статора, 3 – вход для вентиляции насоса, 4 – выход на форвакуумный насос, 5 – защитная сетка/решетка, 6 – ротор, 7 – корпус насоса, 8 и 11 – подшипники, 9 – входы для водяного охлаждения, 10 -- мотор.

Диффузионные паромасляные насосы

До середины 90-х были очень популярны диффузионные паромасляные насосы. Этот тип молекулярных насосов работает за счет передачи молекулам газа количества движения от парообразной быстро движущейся поверхности. Принцип действия был основан на том, что молекулы паров масла разгонялись до скоростей близким к скорости звука и этот поток «захватывал» и уносил в сторону форвакуумного насоса молекулы откачиваемого газа, см. рис.7.

Диффузионные насосы отличаются простотой конструкции, высокой надежностью и неприхотливостью, а также относительной дешевизной. Подобные насосы входят в состав вакуумных универсальных постов ВУП-4 (5 и 5М, производство Украина) и др., хорошо известных на территории РФ. Предельное давление для диффузионных насосов порядка $9 \cdot 10^{-7}$ (при использовании азотных ловушек).

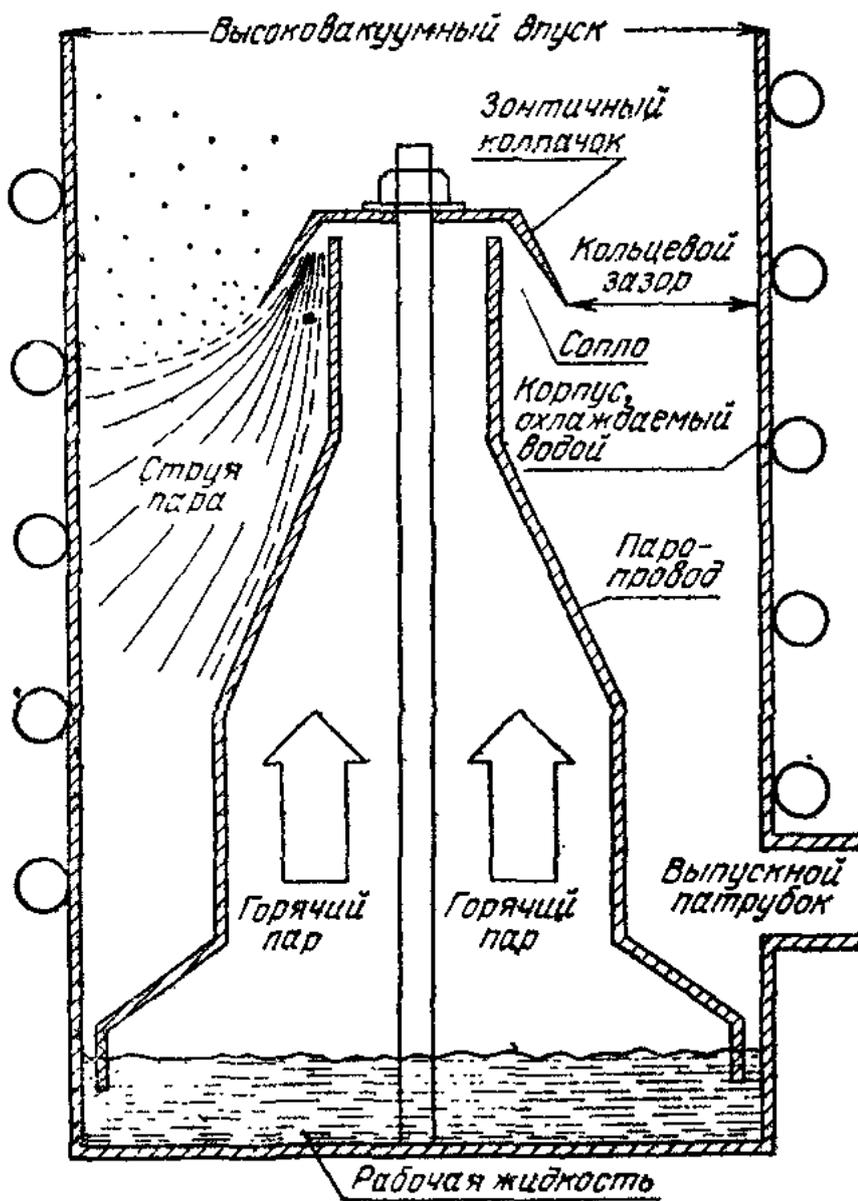


Рис.7 Основные элементы диффузионного насоса.

Криогенные насосы.

Криогенные насосы являются вторым, широко используемым типом высоковакуумных насосов, наравне с турбомолекулярными насосами, по принципу действия относятся к физико-химическим. Рабочими частями криогенных насосов служат охлаждаемые металлические поверхности различной формы (решетки, доски и т.п.). Молекулы откачиваемого газа при контакте с криопанелью конденсируются на них. Насос работает в области низких давлений, при которых длина свободного пробега газа сравнима с размерами рабочей камеры, и молекулы газа долетают до охлаждающих поверхностей без промежуточных столкновений. (Также нужно чтобы происходила конденсация из газообразного состояние в твердое, минуя жидкое). Таким образом криогенные насосы понижают давление очень быстро. При процессе откачки рабочей камеры с атмосферы криогенный насос понижает давление до степени $1 \cdot 10^{-6}$ торр за единицы минут, в тоже время как у турбомолекулярного на это уйдет не менее 20-30 минут (при одинаковой производительности насосов).

Первые крионасосы работали на резервуарах с жидким гелием, см.рис.8 Современные крионасосы построены на принципе замкнутого цикла (гелий находится в замкнутом контуре насоса), имеют две криопанели с температурой 80К (для паров воды) и 15 К, для всех остальных газов, см. рис.9. Для работы насоса нужна периодическая регенерация (освобождение криопанелей от «наросшего» слоя молекул газов). Крионасосы также не откачивают водород, Принципиально крионасос мог бы откачивать водород, однако это не сделано, чтобы избежать взрыва при регенерации насоса. Предельное давление криоконденсационной откачки зависит от температуры поверхности, на которой происходит конденсация откачиваемого газа, и достигает 10^{-9} Па. Обычно давление в рабочей камере при работе крионасосом составляет порядка $5 \cdot 10^{-7}$ торр.

Необходимо отметить, что все высоковакуумные насосы работают только в паре с форвакуумным механическим насосом, подключенным к выходу высоковакуумного.

Для получения сверхвысокого вакуума необходимо использование дополнительных насосов (магниторазрядных, титановых и др.) повышающих степень откачки с 10^{-8} торр до 10^{-10} - 10^{-11} торр.

1

1 — гелиевый насос; 2 — соединительная трубка к установке для сжижения гелия; 3 — манометр; 4 — регулирующий вентиль; 5 — термометр; 6 — датчик температуры; 7 — радиационный экран; 7а — охлаждаемая поверхность; 8 — манометр; 9 — корпус; 10 — вентиль к системе предварительной откачки; 11 — вакуумная рубашка трубки для подачи гелия; 12 — резервуар с гелием

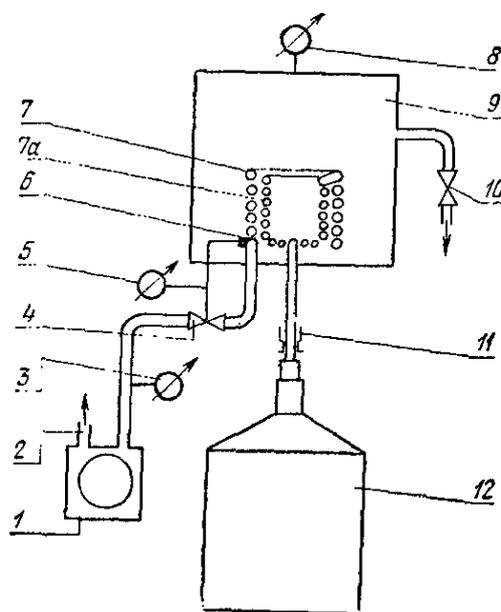


Рис.8 Схема криогенного насоса на жидком гелии, из [1].

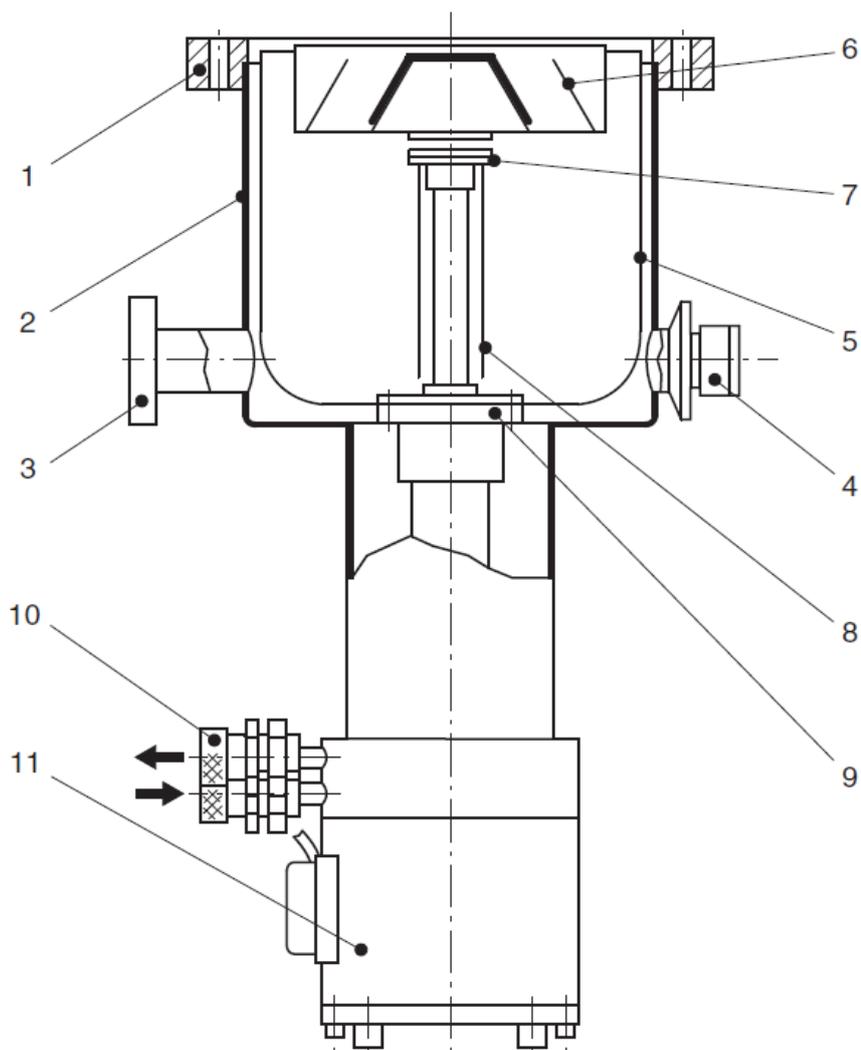


Рис.9 Схема современного навесного криогенного насоса.

1 — высоковакуумный фланец; 2 — корпус насоса; 3 — фланец для предварительной откачки форвакуумным насосом; 4 — предохранительный вентиль с фланцем для подсоединения к выходной линии; 5 — тепловой экран; 6 — экран-дефлектор; 7 — вторая ступень охладителя; 8 — криопанели; 9 — первая ступень охладителя; 10 — подсоединение газообразного гелия; 11 — автономный ожижитель гелия

Тенденции и решения по компоновке и реализации вакуумных систем

Большая часть современных вакуумных установок собирается из готовых компонентов систем вакуумной откачки и средств распыления материала мишени или плазменной обработки подложки. При этом за производителем установки остается производство (заказ) вакуумной камеры необходимых размеров, формы и с необходимыми фланцами для подсоединения необходимых компонент и сборка установки в целом. Часто оказывается, что один-два типо-размера вакуумных камер позволяют скомпоновать высоковакуумные установки удовлетворяющие 90-95% заказчиков. Выбор компонент установки, удовлетворяющих требованиям заказчика, часто делится поровну между заказчиком и исполнителем работ.

Схема стандартной динамической вакуумной системы или системы общего назначения с разборными соединениями приведена на рис. Конструирование подобных систем дает большую свободу в устройстве внутренних элементов, характерно использование для уплотнения камеры, вентиля и вводов прокладок из эластомеров (витона). Считается, что в подобных системах возможно достижение предельного разряжения $5 \cdot 10^{-5}$ - $5 \cdot 10^{-7}$ Торр. Колпак обычно делается из стали диаметром порядка 45 см и объемом 100л. Откачка производится комбинацией форвакуумный и высоковакуумным насосом любого типа (на рис.10 изображен диффузионный насос).

Принцип работы вакуумной системы при классической компоновки выглядит следующим образом. Предположим система находилась в выключенном состоянии. Первым делом включается форвакуумный насос и прокачивает газовые линии до затворов, см. рис.11. Далее должен включиться и «разогнаться» до рабочего режима высоковакуумный насос (пусть ТМН, для определенности). Для этого с его выходу присоединяется форвакуумный насос с помощью

открывания малого затвора 2, см. рис.11. В таком режиме высоковакуумный насос работает в режиме сам на себя (Если не открывать затвор, то при начале движения турбина создаст перепад давлений между входом и закрытым выходом, что в конечном итоге возникнет обратный поток газ, что приведет к перегреву турбины и ее остановке автоматикой). После того как ТМН выйдет в рабочий режим, в рабочей камере создать давление безопасное для работы насоса. В этом случае «малый затвор 2» закрывается и открывается «малый затвор1» (на схеме это 12 и 18 форвакуумные вентили). Рабочая камера откачивается форвакуумным насосом до давлений порядка $1 \cdot 10^{-2}$ торр, являющегося рабочим давлением для любого высоковакуумного насоса. Следующим этапом происходит закрытие малого затвора 1, открытие малого затвора 2 и открытие основного затвора между камерой и высоковакуумным насосом. Далее происходит откачка рабочей камеры до необходимых давлений. В принципе очередность закрытия затвора между форвакуумным насосом и высоковакуумными основного затвора между камерой и высоковакуумным может изменяться в зависимости от типа насоса.

Необходимо отметить что форвакуумная газовая линия между камерой и насосом и между высоковакуумным и форвакуумным насосом обычно выполняется их металлических трубок малого диаметра, порядка 3-7 см. Это связано с тем, что на этом участке линии всегда низкий вакуум, вязкое течение газа и для откачки площадь сечения не так важна. Затвор между рабочей камерой и высоковакуумным насосом наоборот имеет большую площадь – т.к. в этом случае происходит молекулярная откачка и нужно повысить вероятность попадания каждой молекулы газа в насос.

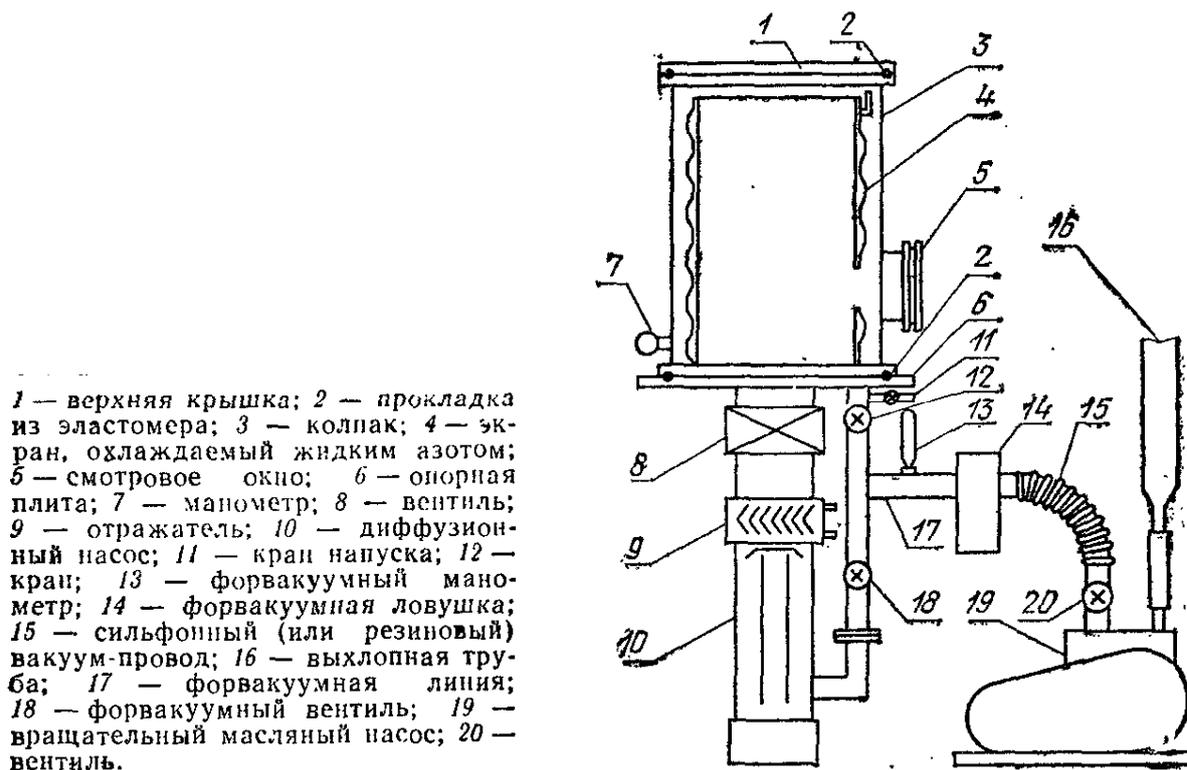


Рис.10 Схема стандартной вакуумной системы с диффузионным насосом с обозначением элементов (схема ВУП-5), из [1].

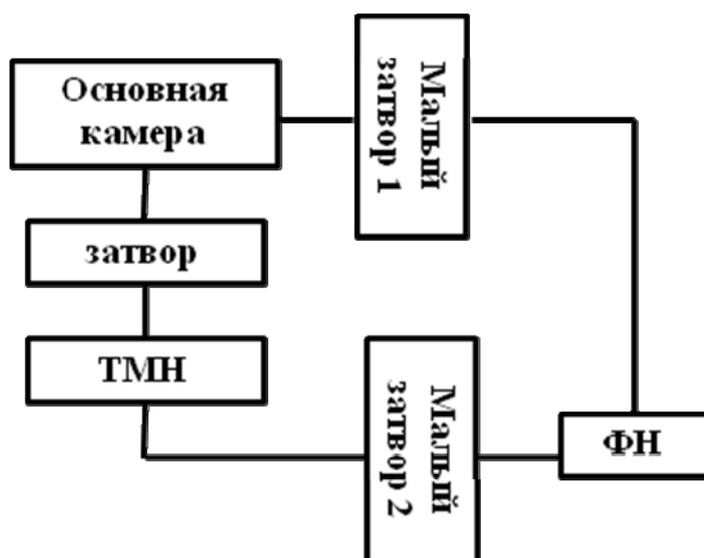


Рис.11 Блок-схема основных узлов стандартной вакуумной системы классической компоновки. (ФН — форвакуумный насос, ТМН — турбомолекулярный насос)

Высоковакуумный комплекс "Аврора". Вакуумная часть.

В высоковакуумном комплексе "Аврора" используется только одна ступень высоковакуумной откачки: турбомолекулярный насос (ТМН) в паре с безмасляным механическим форвакуумным насосом (ФН, dry lobe type backing pump). Современные турбомолекулярные насосы позволяют производить откачку прямо с атмосферного давления, что позволяет упростить систему откачки.

ТМН насос через затвор присоединяется к рабочей камере, а форвакуумный насос подключается напрямую к выходу ТМН (без затворов и вентилях), см. рис12. Такая компоновка стала возможной, т.к. ТМН может работать с атмосферных давлений (в режиме набора оборотов). ТМН старого типа могли работать только с давлений 10^{-1} - 10^{-2} Торр, что и требовало для работы сначала откачивать рабочую камеру форвакуумным насосом (по отдельной линии), а потом переключать откачку форвакуумного насоса на ТМН.

Даже без дополнительных ступеней откачки и азотных ловушек, такая комбинация может откачивать камеру до давлений порядка $2 \cdot 10^{-8}$ торр. Для загрузки образцов в напылительную камеру используется дополнительная загрузочная камера со своей отдельной системой откачки. Загрузочный шлюз отделен от основной камеры ручным высоковакуумным затвором. Необходимость наличия загрузочного шлюза вызвана тем, что основное время откачки из камеры уходит на откачку паров воды из остаточного газа в камере. При высокой влажности в атмосфере, особенно в летний период, при откачке газов из камеры после загрузки образца, возможно даже выпадение воды или осаждение льда на стенки камеры из остаточной атмосферы (при переходе через точку росы). Этот лед дальше начинает «испаряться» и делает невозможным достижение высокого давления в течении нескольких десятков часов. Откачка загрузочной камеры, а потом передаче образца из загрузочной камеры в основную камеру, всегда находящуюся под высоким вакуумом, позволяет избежать подобных проблем. Использование двух камер в процессе откачки, позволяет

приступать к работе в высоком вакууме уже через 30-60мин после начала включения всей установки.

Если загрузочный шлюз отсутствует, то без отжига (прогрева) основной камеры, до достижения высокой степени остаточного вакуума могут уходить недели, см.табл.5. В таблице приведены параметры достижения предельного вакуума по времени для установки с малым натеканием.

Необходимо отметить, что классическая компоновка вакуумной системы фактически обязательна при работе с диффузионным и криовакуумным насосом.

Таблица 5

Влияние прогрева на уровень предельного вакуума, из [1].

Температура отжига, °С	Время отжига	Предельный вакуум, торр
Комнатная	2 недели	$8 \cdot 10^{-7}$
125	4 ч.	$4 \cdot 10^{-7}$
225	12 ч.	$5 \cdot 10^{-9}$
425	Несколько повторных циклов	$2 \cdot 10^{-10}$

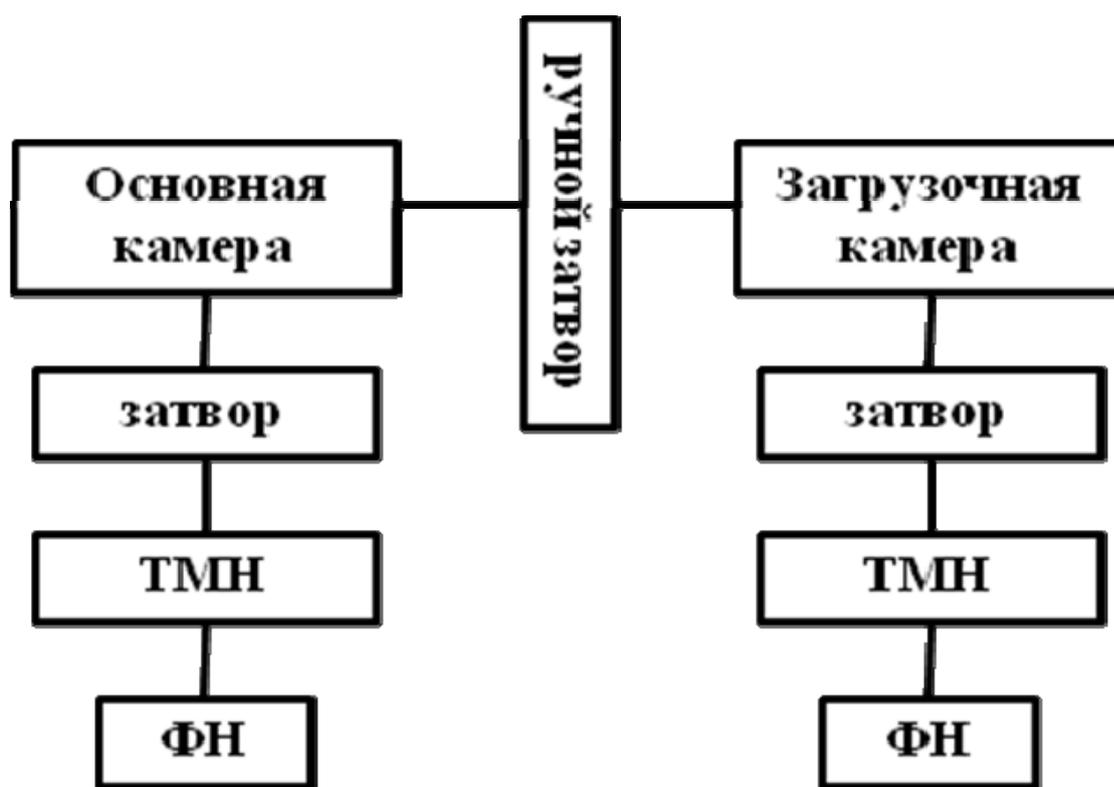


Рис.12 Блок-схема основных узлов современной вакуумной системы с турбомолекулярным насосом.

(ФН – форвакуумный насос, ТМН – турбомолекулярный насос)

ОСНОВЫ ТОНКОПЛЕНОЧНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В тонкопленочных технологиях наибольшее распространение получили две методики получения пленок в вакууме: испарение и ионное распыление. При использовании методов испарения осаждаемое вещество (мишень) нагревается до температуры испарения, и затем его пары конденсируются на подложке. Здесь наибольшее распространение получили способы термического испарения (разогрев материала печкой) и электроннолучевой нагрев. При первом способе происходит прямой нагрев вещества нагревательным элементом, см.рис.13. Во втором способе испарения материал переводится в пар с помощью сфокусированного электронного пучка большой мощности, см. рис.14.

При использовании методики ионного распыления материал распыляемой мишени находится при комнатной температуре бомбардируется низкоэнергичными ионами из плазмы газового разряда. Наиболее эффективными и распространенными системами ионного распыления являются магнетронные системы. Методы магнетронного распыления позволяют создавать металлические, в том числе особенно сверхпроводящие и ферромагнитные пленки, диэлектрические (как из диэлектрических материалов, так и в атмосфере реактивных газов). Пленки изготовленные магнетронным распылением имеют высокую адгезию, подложка при этом не разогревается, что позволяет напылять на материалы с низкой термостойкостью (фоторезисты). Возможно распыление тугоплавких материалов.

Именно такая распылительная система установлена в высоковакуумном комплексе «Аврора».

В магнетронных системах используются скрещенные магнитные и электрические поля. Распыление мишени происходит за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа, образующихся в плазме аномального тлеющего разряда. С помощью сильного магнитного поля достигается

локализация плазмы вблизи поверхности распыляемой мишени и увеличивается плотность ионного тока. Схематическое движение электронов и иона рабочего газа, приведено на рис. 15. Основными составляющими магнетронной системы являются катод-мишень, анод и магнитная система. Принципиальная схема и принцип работы кольцевого планарного магнетрона приведена на рис.16.

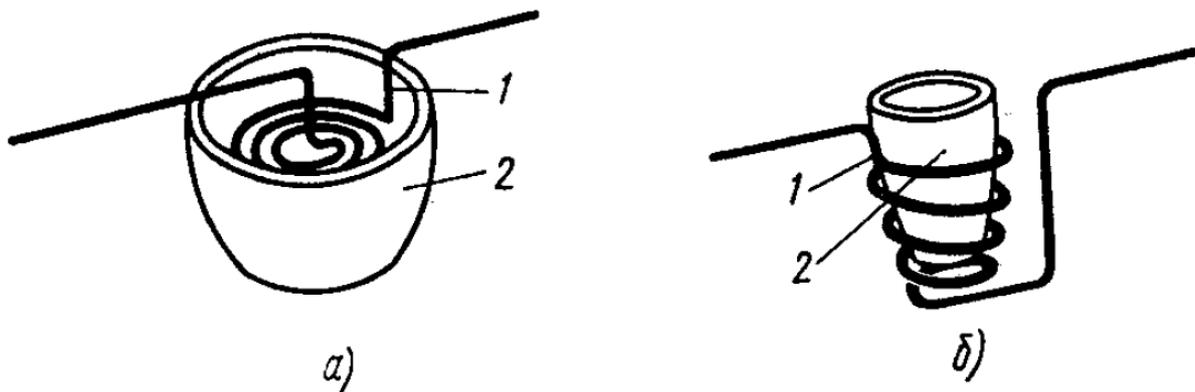


Рис.13 Испарители прямого нагрева с тиглями с внутренним (а) и внешним (б) спиральным нагревательным элементом.

1- спираль, 2 - тигель

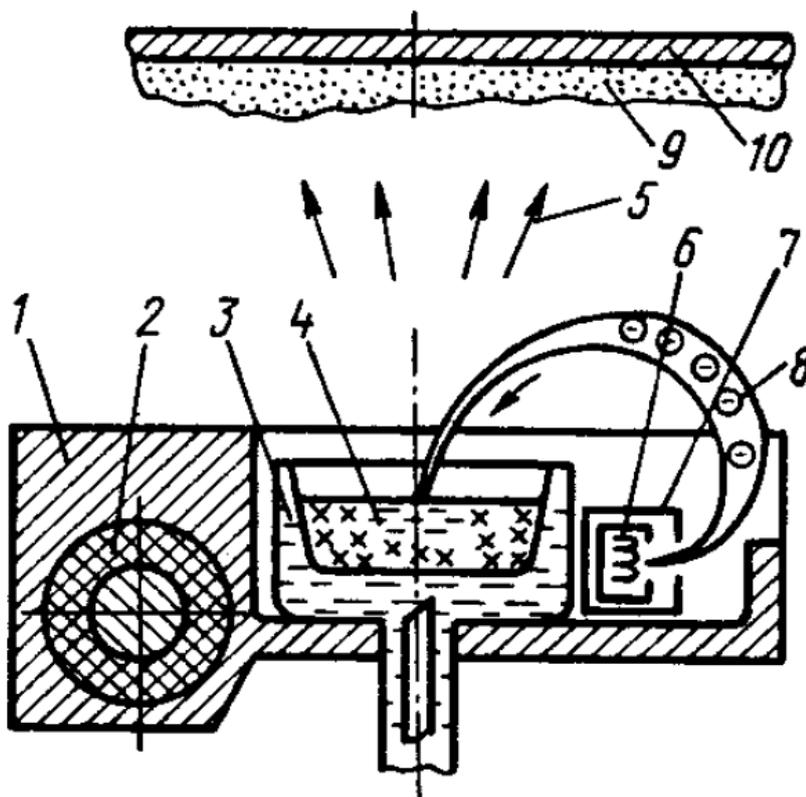


Рис. 14 Электронно-лучевой испаритель: 1 – полюсный наконечник, 2 – электромагнит, 3 – водоохлаждаемый тигель, 4 – испаряемый материал, 5 – поток наносимого материала, 6 – термокатод, 7 – фокусирующая система, 8 – электронный луч, 9 – тонкая пленка, 10 – подложка

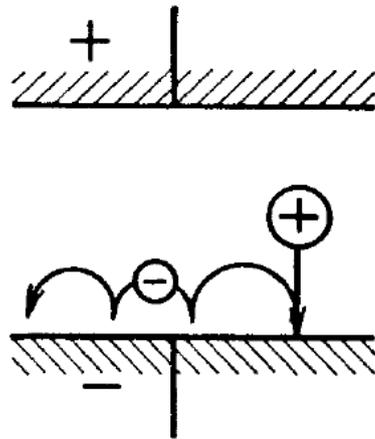


Рис.15. Траектории движения электрона и иона в скрещенных электрическом и магнитных полях.

В кольцевом планарном магнетроне все элементы смонтированы в корпусе 18, присоединенное к рабочей камере через промежуточное изолирующее кольцо 2 и фланец 4 с вакуумными уплотнительными прокладками 1 и 3, см. рис.16. Дiskoобразная мишень-катод 19 охлаждается проточной водой по трубкам 14 и 17. Напряжение, подаваемое на катод через зажим 16, равно 300-700В. Под катодом расположен магнитный блок, состоящий из центрального 15 и периферийных 12 постоянных, закрепленных на основании блока 13, изготовленного из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает магнитное поле на 11 (порядка 200–500 Гс). Составляющая поля параллельна плоскости катода. Анод 10 расположен над катодом и может находиться либо под потенциалом земли, либо под напряжением 30-100 В относительно катода и обеспечивает образование электрического поля 9. Составляющая этого поля перпендикулярна плоскости катода.

При подаче отрицательного потенциала на катод в прикатодной области образуется зона скрещенного и магнитного и электрических полей. Находящиеся там электроны совершая сложные движения под действием полей ионизируют газ. В результате появляется возникает разряд и над поверхностью катода образуется кольцеобразная (торообразная) зона плазмы 5 сопровождающаяся световым излучением. При этом положительные ионы рабочего газа ускоряются в направлении катода, бомбардируя и распыляя его поверхность в зоне 8, называемой зоной эрозии. Атомы материала, выбитые с поверхности мишени, осаждаются в виде пленки 7 на подложке 6, а также частично рассеиваются молекулами остаточных газов и осаждаются на стенках рабочей камеры.

На рис. 17 представлена схема магнетрона установки "Аврора".

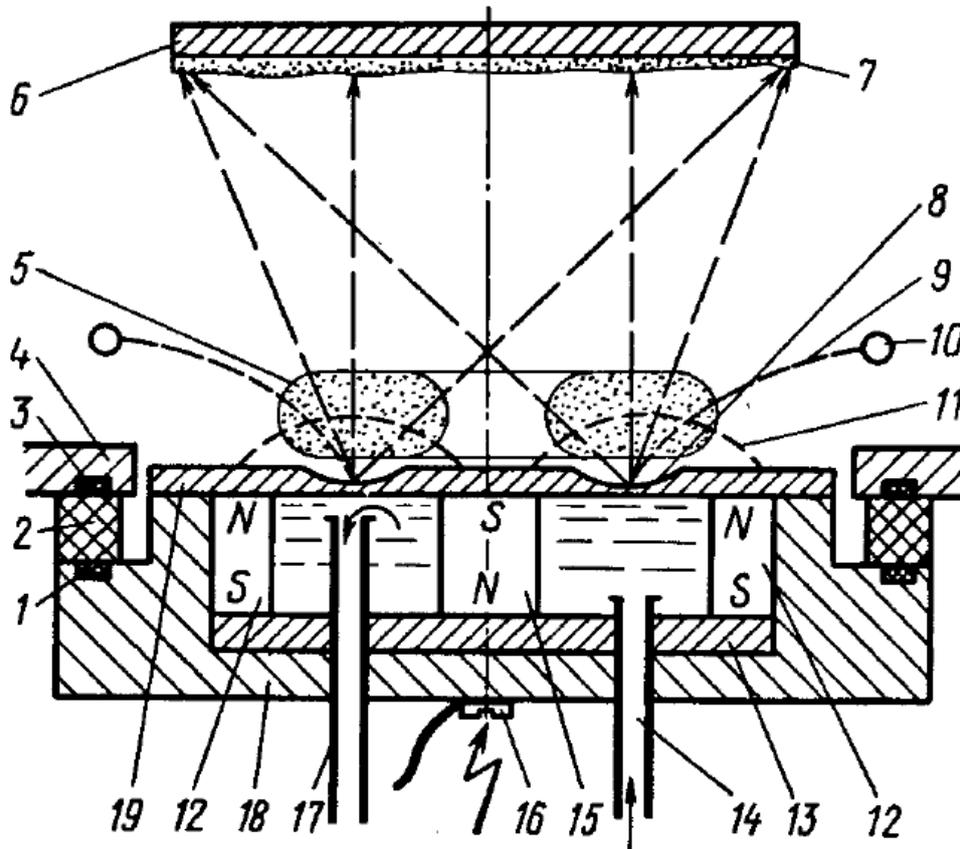


Рис.16 Кольцевой планарный магнетрон, из работы [4]. Схема магнетрона и принцип работы. 1,3 уплотнительные прокладки, 2 изолирующее кольцо, 4 – фланец камеры, 5,8- зоны плазмы и эрозии, 6 – подложка, 7 – тонкая пленка, 9,11 – электрическое и магнитные поля, 10 - анод,12,15 – периферийные и центральный магниты, 13 – основание магнитного блока, 14,17 – трубки подачи и слива воды, 16 – зажим 18 – корпус, 19 – мишень

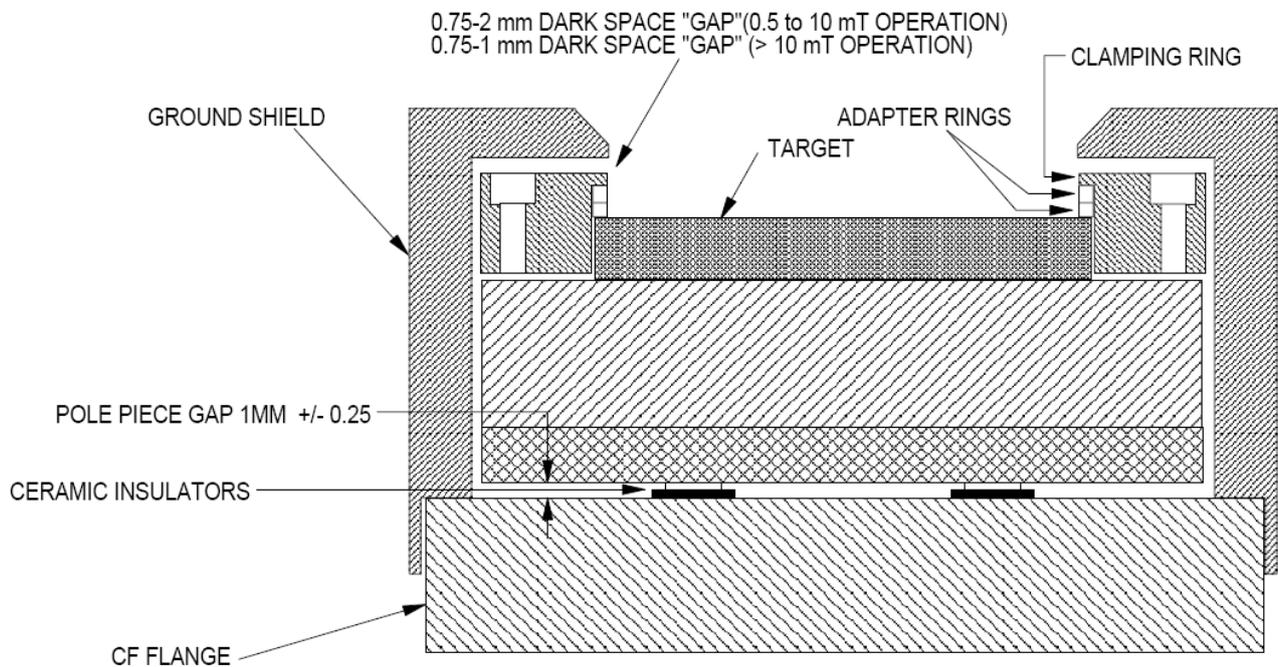


Рис.17 Схема общего вида магнетрона установки «Аврора» (описания схем из технической документации на комплекс "Аврора" приводятся на языке оригинала – на английском).

По типу питания различают магнетронные распыления двух типов: на постоянном токе и на переменном токе. В первом случае между анодом и мишенью подается постоянное напряжение, ускоряющее ионы рабочего газа к подложке. В случае переменного напряжения горение плазменного разряда устроено так, что в катодной области создается эффективное электрическое поле, ускоряющее ионы рабочего газа к подложке. Обычно ВЧ распыление применяется для работы с диэлектрическими материалами или легко окисляющимися материалами (Al, Mg и др.). Необходимо отметить, что в последние годы появился новый вид магнетронного распыления – с импульсным питанием, обеспечивающие меньший нагрев мишени, но подобные системы только начинают внедряться.

В зависимости от типа магнитной системы, вернее от конфигурации магнитного поля, магнетроны делятся на сбалансированные и несбалансированные. С физической точки зрения магнитная система определяет особенности горения плазмы. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами системы.

Поверхность мишени, находящаяся в местах входа и выхода силовых линий магнитного поля, распыляется наиболее интенсивно имеет вид замкнутой дорожки. Для магнетронов комплекса вид этой дорожки – кольцо.

На рис.18 представлены различные возможные конфигурации магнитных систем в магнетронах (из технической документации на комплекс). Под мишенью в корпусе магнетрона находятся системы наборных редкоземельных магнитов, создающих магнитное поле в несколько сот Гаусс. Магниты можно частично заменять ферромагнитными железными вставками (слабо коэрцитивный материал с меньшей величиной намагниченности насыщения), тем самым меняя конфигурацию магнитного поля системы. В зависимости от конфигурации магнитного поля меняется разряд над поверхностью мишени. В конечном итоге меняются зоны эрозии мишеней, скорости распыления мишеней. По

конфигурации магнитного поля магнетроны делят на сбалансированные и несбалансированные, см. рис.18. Для распыления магнитных материалов магнетрон должен иметь сбалансированную магнитную конфигурацию, при этом толщина ферромагнитной мишени не может превышать 3 мм. Толщина мишени из немагнитных материалов может достигать 6 мм, и ограничена геометрическими размерами магнетрона.

Магнетроны могут работать при давлении рабочего газа 0.5 – 30 мторр, средняя скорость напыления может варьироваться в широких пределах и составлять от долей нм до десятков нанометров в секунду. Более подробные описания работы магнетронных систем представлены например в [1,7,8 и др].

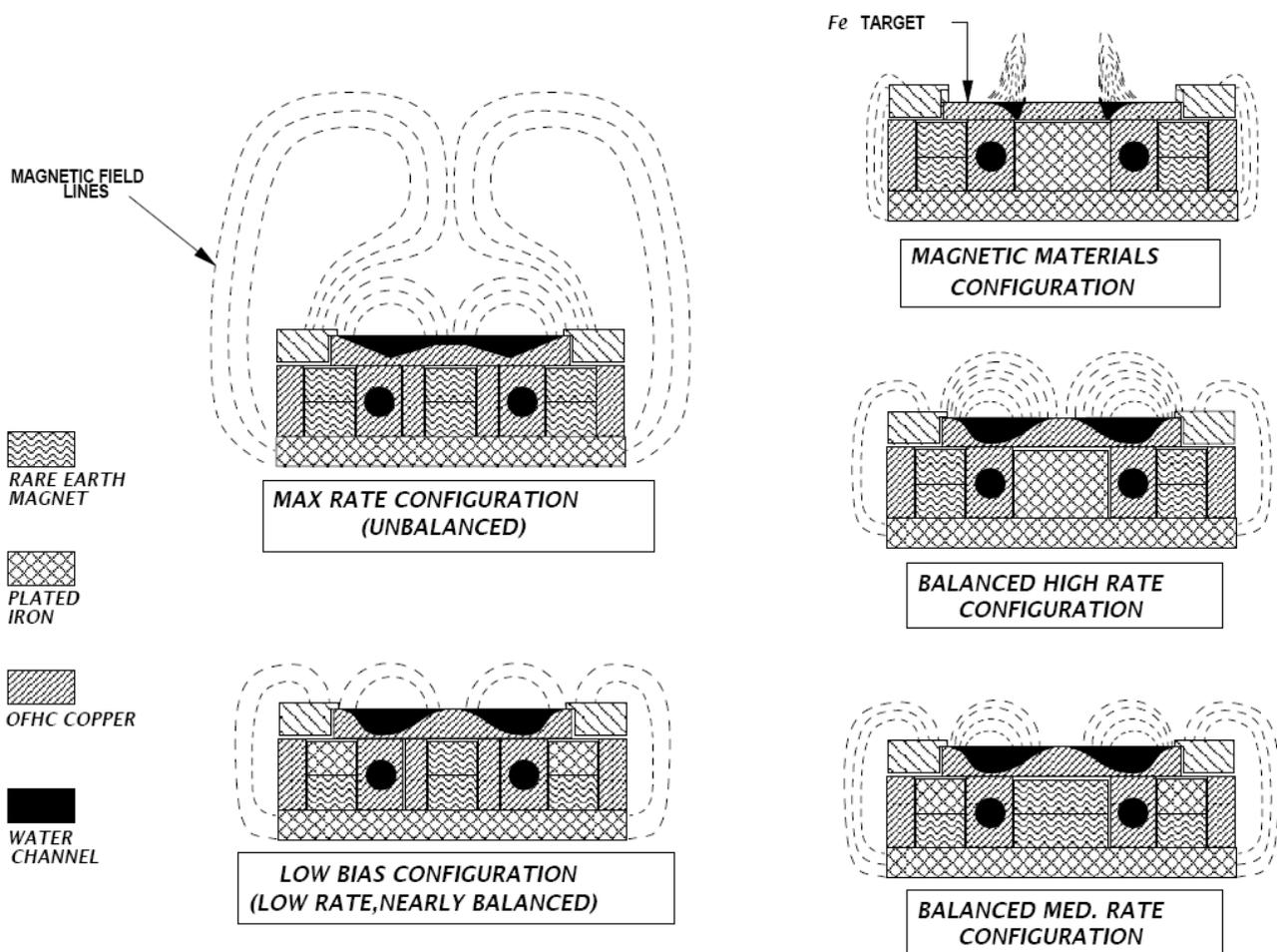


Рис.18 Конфигурации магнитных систем магнетронов, на примере магнетронов установки «Аврора». Из технической документации на комплекс "Аврора".

Ионно-плазменная обработка

Обратным процессом для напылению тонких пленок является процесс ионного травления, часто называемого сухим травлением. Подобные процессы используются, например, для прямой передачи рисунка из фоторезиста в тонкую пленку рабочего материала. Также для создания современных элементов микроэлектроники необходимо проведение процессов плазменной обработки в едином цикле с вакуумным напылением. Это может быть как предварительная плазменная чистка поверхности подложки или проведение плазменного окисления.

По способу возбуждения разряда (создания плазмы) источники делят на два типа:

- 1) безкатодный высокочастотный источник индуктивно-связанной плазмы.
- 2) катодные источники плазмы на постоянном токе.

Система экстракции ионов из плазмы определяет конфигурацию источника, конечный размер и поперечное сечение пучка ионов. Фактически источник должен ионизировать рабочий газ в катодной системе, дальше вытянуть пучок ионов с помощью системы экстракции. Плотность тока и энергия ионов, степень однородности ионного пучка в пространстве и его расходимость являются основными конечными характеристиками, определяющими применение ионного источника. Каждый тип источников имеет свои преимущества при проведении различных процессов.

Для проведения процесса травления различных металлических пленок, более удобным является источник на постоянном токе. Это связано с более простой реализацией вытягивания ионов из плазмы и их ускорение до необходимых энергий. Например, источники с горячим катодом (источник Кауфмана) [10], см. рис.19. Ионизация газа – аргона – происходит в пространстве

нагреваемый катод–анод при подаче на анод положительного напряжения порядка 100 В. Эмитированные из катода электроны двигаясь к аноду, вызывают ионизацию. Направление электрического и магнитного поля в этом источнике совпадают. Образовавшиеся ионы вытягиваются из плазмы электрическим полем узлом экстракции, состоящих из трех сеток (дисков со множеством отверстий.) Первая сетка ускоряющая, вторая имеет отрицательный потенциал относительно плазмы для отражения электронов, и третья заземлена. Прозрачность сеток около 80%.

В высокочастотных источниках катод отсутствует. Электрическое поле возбуждается как поле индукции, возбуждаемое антенной в виде плоской или цилиндрической катушки индуктивности, см. рис 20.

В состав комплекса Аврора входят ВЧ источники ИСП "Cobra" (CCR Technology, Germany) с однозаходной цилиндрической антенной с магнитным удержанием плазмы. Источники позволяют получать пучок ионов диаметром порядка 10 см, с энергией от 20эВ до 100 эВ, в зависимости от давления рабочего газа. Это позволяет проводить очистку поверхности подложек для увеличения адгезии, а также проводить плазмо-химическое травление и плазменное окисление.

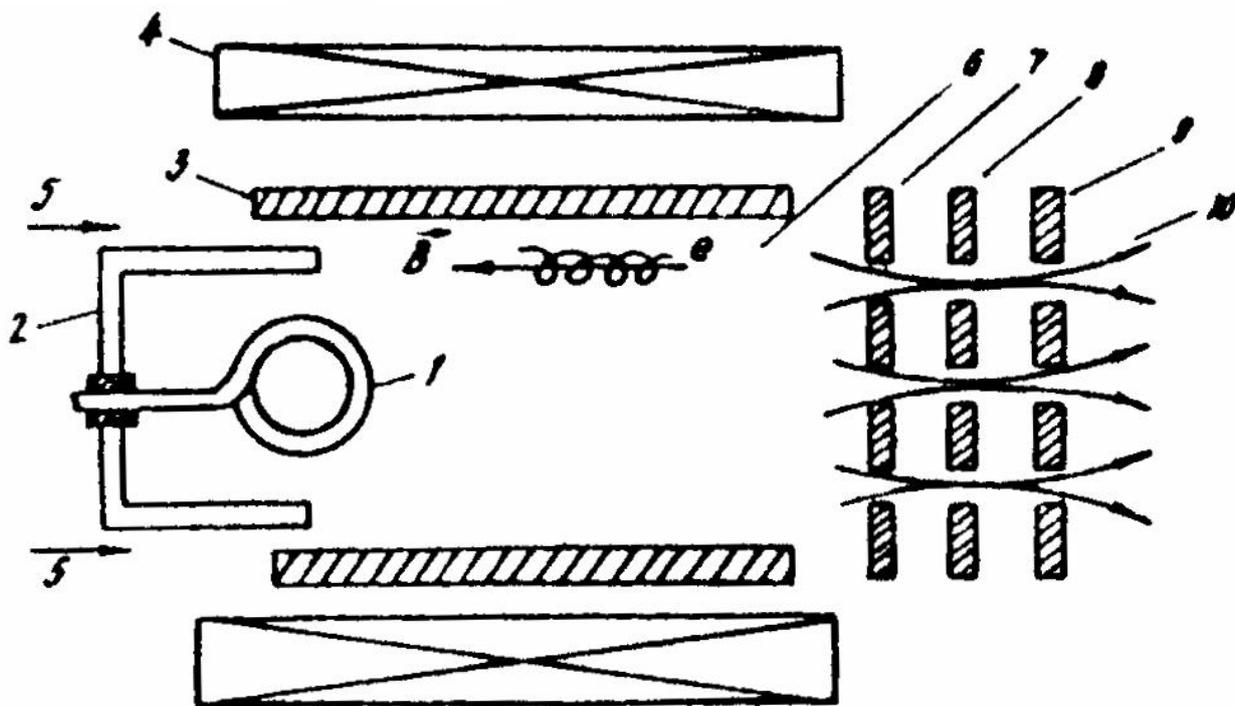


Рис.19 Ионный источник Кауфмана 1 - термокатод, 2 - экран катода, 3 - цилиндрический анод, 4. - соленоид, 5 - ввод рабочего газа, 6 - плазма, 7 - эмиссионный электрод, 8 - ускоряющий электрод, 9 - замедляющий электрод, 10 - ионный пучок

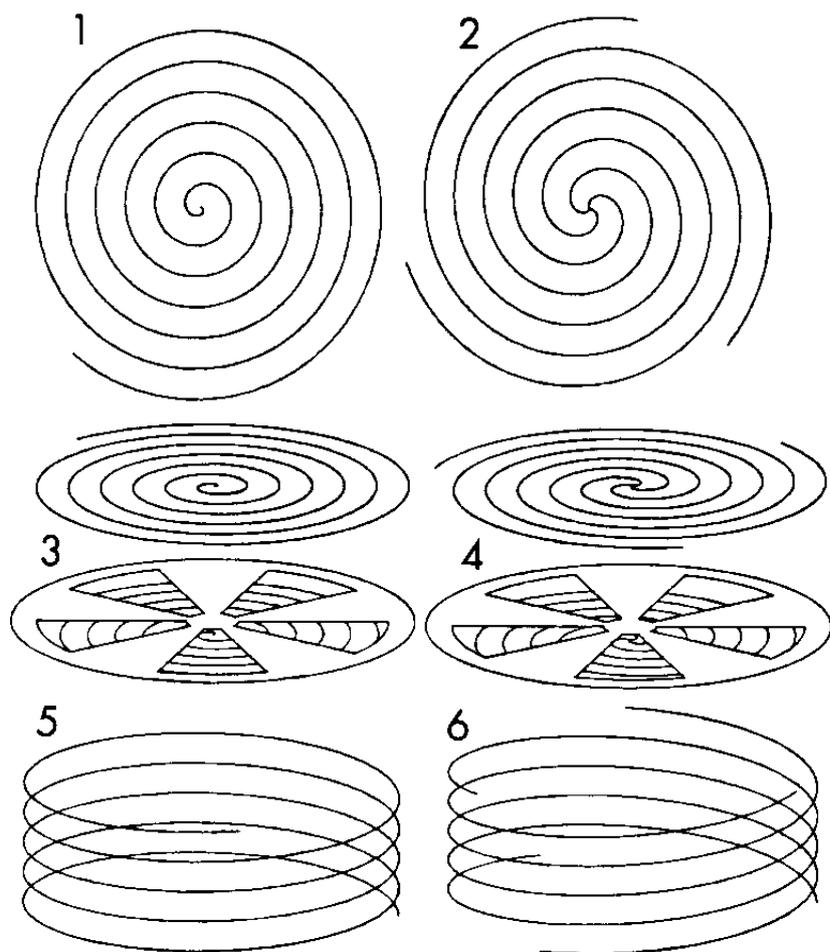


Рис.20 Варианты индуктивных антенн, [8]. 1 – антенна в виде плоской спирали, 2 – антенна в виде многозаходной спирали, 3 и 4 – экранированные антенны, 5 и 6 – однозаходная и многозаходная цилиндрические антенны

Приложение.

Краткие характеристики комплекса "Аврора"

Назначение комплекса:

- 1) Напыление металлических пленок с большим количеством мишеней, используемых в едином вакуумном цикле.
- 2) Создание ферромагнитных пленок с запиннигованной намагниченностью антиферромагнетик-ферромагнетик (АФ-Ф).
- 3) Хорошо контролируемое формирование туннельнопрозрачных диэлектрических слоев, в том числе MgO и Al₂O₃ различными методами для создания магнитных туннельных контактов.
- 4) ионное и плазмохимическое травление тонкопленочных структур в атмосфере различных газов, включая Ar, O₂, SF₄ при малых ускоряющих напряжениях.
- 5) Создание гибридных структур ферромагнетик-сверхпроводник с эффектом близости.

Состав комплекса:

В составе комплекса 3 вакуумных камеры, по назначению камеры делятся на 2 блока: блок ионного распыления: камера ионного распыления (основная), блок плазменной обработки, состоящий из камеры загрузки (шлюз) с возможностью ионного и плазмохимического травления и камеры плазменного окисления, см. рис.21

Базовое давление в камерах:

- Камера ионного распыления: не хуже чем $5.0 \cdot 10^{-8}$ торр.
- Камеры Загрузки и Окисления: не хуже чем $5.0 \cdot 10^{-7}$ торр (через 30 мин откачки).

Ионное распыление материалов:

- Метод распыления - магнетронный (DC и RF), количество магнетронов:
- 11 (8шт. –конфокальные , 3 шт. прямого напыления)
- Диаметр мишени 2", Размер подложки 4" (до 100 мм)
- Одновременная работа 5 DC магнетронов и 2 RF магнетрона
- Заложены возможности реактивного напыления: атмосфера N₂ или O₂ (SiN_x, AlO_x, MgO, TaO_x, NbO, NbN_x и др.)

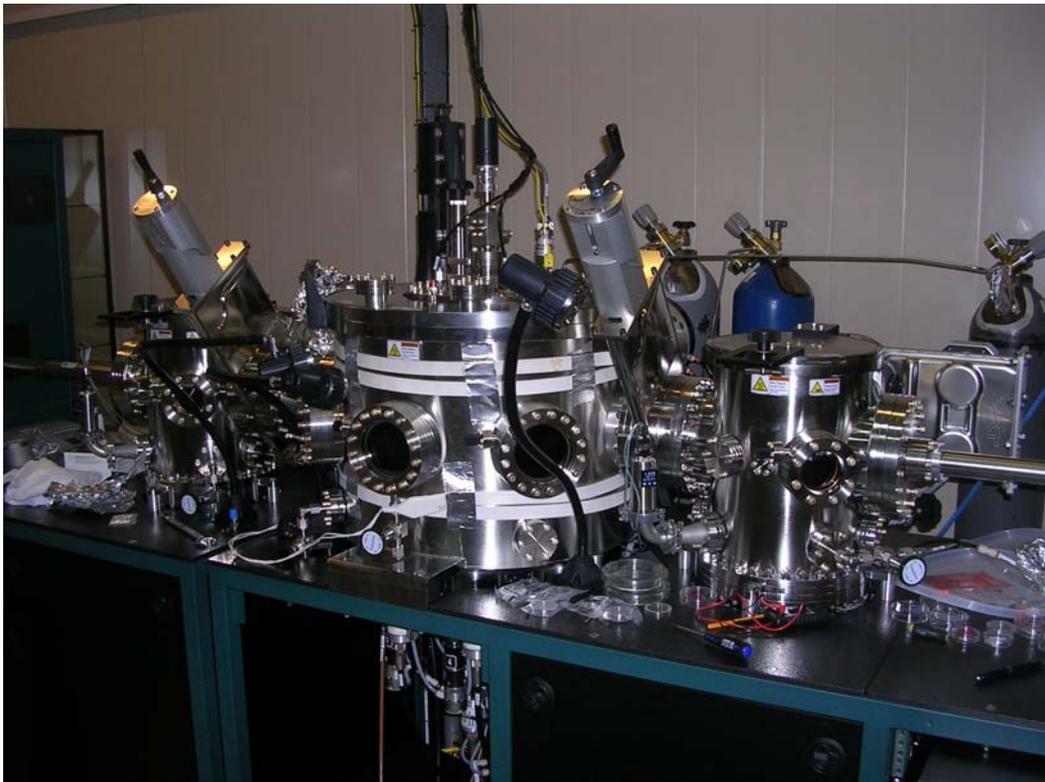


Рис.21. Фотография высоковакуумного комплекса "Аврора" (на фото 3 вакуумных камеры, блоки управления в фотографию не вошли).

Комплекс "Аврора" управляется с помощью компьютера. Это включает режимы подачи рабочих газов, управление питанием магнетронов и ионных источников, существует возможность программирования напылительных процессов. Изображение программной оболочки представлено на рис.22

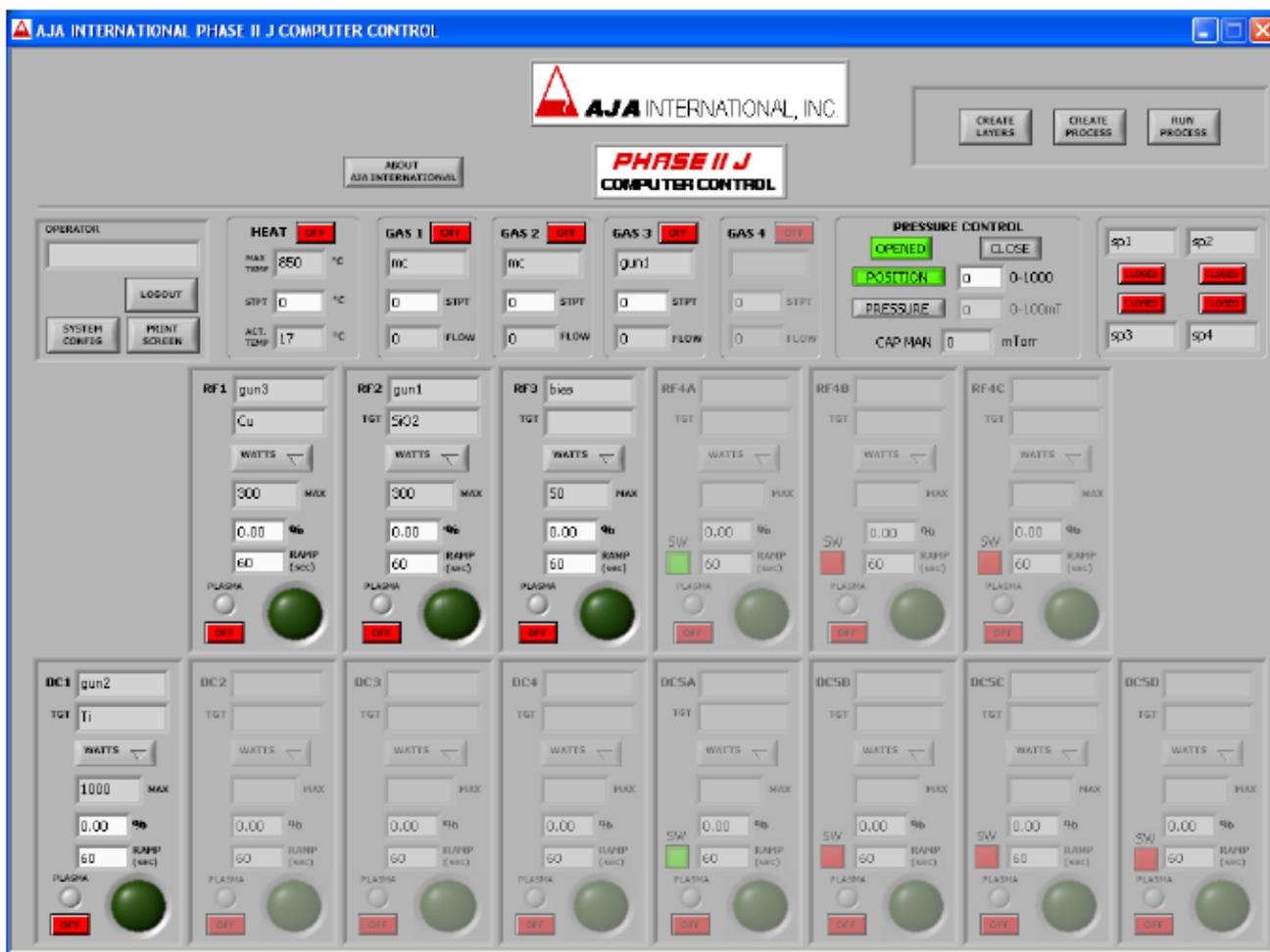


Рис.22. Вид программной оболочки системы управления комплекса "Аврора".

Контрольные вопросы

1. Чем определяется предельная степень откачки форвакуумным насосом.
2. Возможно ли использовать крионасос с магнетронным напылением.
3. Может ли включенный турбомолекулярный насос скачивать из камеры под атмосферным давлением.
4. Основной механизм роста тонких пленок при магнетронном распылении.
5. Существует ли ограничение на толщину мишени ферромагнитного материала.
6. Принципы работы ионного источника Кауфмана.

Задания для студентов

1. Сдать допуск по технике эксплуатации комплекса преподавателю.
2. Напустить продувочный газ в загрузочную камеру (при выключенном ТМН насосе и при закрытом затворе к насосу).
3. Закрепить подложку кремния на подложкодержателе и поместить подложкодержатель в передаточный механизм.
4. Произвести откачку загрузочной камеры и основной камеры.
5. Передать образец из загрузочной в основную камеру.
6. Провести напыление, по заданию преподавателя.
7. Вынуть образец (с передачей из основной камеры в загрузочную, остановкой насосов загрузочной камеры и вентилированием).
8. Исследовать свойства изготовленной пленки (совместно с преподавателем) (сверхпроводящие или ферромагнитные свойства при наличии возможности).

Литература

1. Технология тонких пленок: Справочник в 2-х томах/ Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга – М.: Сов. радио, 1977. – 664 с. и 770 с.
2. Антоненко С.В. Технология тонких пленок. М.: МИФИ, 2008. 104 с.
3. Е.П. Шешин. Вакуумные технологии, 504с.,Интеллект,2009
4. В.Е. Миначев. Нанесение пленок в вакууме. Серия Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники, книга 6. Изд. Высшая школа,1989
5. Розанов Л.Н. Вакуумная техника — М.: Высшая школа, 1990.
6. Данилин Б.С. Вакуумные процессы и оборудование микроэлектроники. М.: Машиностроение, 1987. 72 с.
7. Walter Umrath. Fundamentals of Vacuum Technology. Laybold, 1998.
8. Е. Берлин, С.Двинин, Л. Сейдман. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. М. Техносфера, 2007
9. Физика твердого тела. Лабораторный практикум под ред. А. Ф. Хохлова, Т. 2. Н. Новгород, ННГУ,2000.
- 10.Г.Ф. Ивановский, В.И. Петров. Ионно-плазменная обработка материалов. М. Радио и связь,1998.