

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

ОСНОВЫ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие
для студентов направления
«Электроника и наноэлектроника»

2018

Орликов Леонид Николаевич.

Основы вакуумных технологий: учебное пособие для студентов направления «Электроника и наноэлектроника» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2018. - 89 с.

В пособии рассматриваются:

- физические принципы формирования приборов электроники и наноэлектроники на основе вакуумных технологий;
- основные приемы построения последовательностей технологических операций при формировании и синтезе оптических материалов в вакууме;
- современные вакуумные технологии, применяемые при производстве приборов электроники и наноэлектроники;
- принципиальные схемы последовательностей технологических операций;
- оптимальные режимы проведения технологических операций в вакуумных устройствах;
- анализ достоинств и недостатков известных вакуумных технологий формирования оптических материалов на элементах электроники и наноэлектроники.

Приведены основы конструирования и сервисного обслуживания современных вакуумных систем.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Основы вакуумных технологий»

© Орликов Леонид Николаевич, 2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники»

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____С.М. Шандаров
«__» _____ 2018 г.

ОСНОВЫ ВАКУУМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Учебное пособие
для студентов направления
«Электроника и нанoeлектроника»

Разработчик
д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____Л.Н.Орликов
«__» _____ 2018 г

2018

Содержание

1 Вакуумная технология.....	6
1.1 Общие понятия.....	6
1.2 Типовые вакуумные системы и установки	6
1.3 Единицы измерения давления и потока	8
1.4 Режимы течения газа.....	9
1.5 Проводимость вакуумных коммуникаций.....	9
1.6 Основное уравнение вакуумной техники.....	11
1.7 Технология получения вакуума	12
1.8 Измерение вакуума.....	20
2 Расчет вакуумных систем.....	23
2.1 Методика расчета вакуумных систем.....	23
2.2 Методики экспериментального исследования вакуумных систем на герметичность.....	27
2.3 Тенденции развития вакуумной техники	28
3 Подготовка изделий к технологическим операциям.....	33
3.1 Источники загрязнений при производстве приборов	33
3.2 Закономерности газовыделения из изделий	33
3.3 Вакуумная гигиена	34
4 Пленочная технология.....	37
4.1 Назначение и типы пленок	37
4.2 Методы синтеза пленочных материалов.....	37
4.3 Термовакuumное формирование пленок	38
4.4 Условия, влияющие на формирование пленки при термовакuumном напылении.....	42
4.5 Получение пленок равномерной толщины	43
4.6 Адгезия пленок.....	44
4.7 Измерение скорости напыления и толщины пленок.....	46
4.8 Методы измерения параметров напыления	48
4.9 Экспресс методы сравнительного анализа толщины пленок.....	52
4.10 Специальные методы нанесения пленок.....	53
4.11 Эпитаксия	60
4.12 МОС - гидридная эпитаксия.....	61
4.13 Молекулярно-лучевая эпитаксия	62

5 Сертификация технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов	72
5.1 Общие понятия.....	72
5.2 Маркировка эпитаксиальных структур	70
6 Разработка инструкций по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала.....	73
6.1 Инструкция по эксплуатации оборудования	74
6.2 Инструкции по сервисному обслуживанию различных типов вакуумных установок	76
6.3 Аварийные режимы вакуумного оборудования и методы реанимации режимов.....	83
6.4 Инструкции по эксплуатации ЭВМ	85
Список рекомендуемой литературы.....	88

1 Вакуумная технология

1.1 Общие понятия

Понятие "вакуум" определяется как состояние газа, при котором его давление ниже атмосферного. Вакуумная техника, помимо традиционного применения в производстве электровакуумных приборов и приборов твердотельной электроники, получила широкое распространение в самых разнообразных областях науки и техники - от обработки продуктов питания и изготовления строительных материалов до имитации космического пространства и проведения уникальных физических исследований. В результате все большее число работающих привлекается к обслуживанию вакуумного оборудования

Вакуум является рабочей средой для перемещения различного рода нейтральных молекул и заряженных частиц (электронов, ионов). При атмосферном давлении движение многих частиц невозможно из-за большого количества соударений с окружающими молекулами и потерей энергии. Вакуум получают специальными откачными средствами (вакуумными насосами). Место для проведения технологического процесса (вакуумная камера) соединяется с вакуумным насосом специальной трассой в виде трубопровода с встроенными кранами (вентильями), измерителями давления, конструкциями для улавливания масел. Такой набор элементов, снабженный системой электропитания, индикации параметров и управления называется вакуумной установкой.

1.2 Типовые вакуумные системы и установки

Для изготовления приборов различного назначения требуются вакуумные системы с различными возможностями по скорости удаления газов, по содержанию паров рабочих масел, по предельному давлению и т.д.

На рис. 1.1 представлены некоторые схемы вакуумных систем:

- 1) системы общего назначения (рис. 1.1 а);
- 2) централизованные вакуумные системы;
- 3) системы непрерывного действия (рис 1.1 б);
- 4) системы типа вакуум в вакууме (рис 1.1 в).

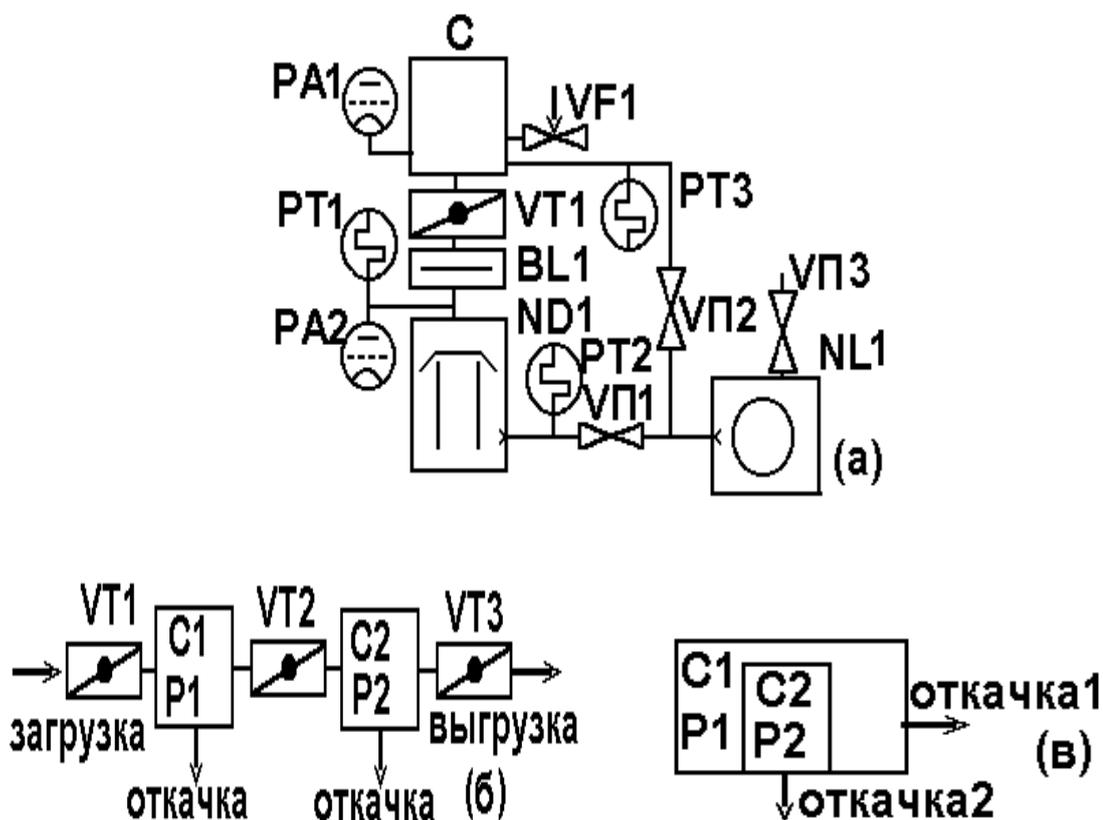
Вакуумные системы периодического действия имеют относительно малые габариты, просты в обслуживании и нашли широкое

распространение в производстве. К таким системам относится большинство электрофизических установок среднего типоразмера (УВН-2М, УРМ-387, КАТОД и др.).

Системы с централизованной откачкой. В этом случае механические вакуумные насосы вынесены в отдельное помещение для устранения шума и вибрации.

Установки непрерывного действия позволяют обеспечить непрерывность технологического процесса с использованием шлюзовых загрузочных систем.

Системы типа вакуум в вакууме широко применяются при необходимости быстрого получения высокого вакуума с минимальным содержанием паров масел.



BL1 – ловушка масел; *C1, C2* – вакуумные камеры; *ND1* – высоковакуумный (диффузионный) насос; *NL1* – форвакуумный (механический) насос; *PA1, PA2* – датчики давления; *PT1–PT3* – терморезисторные датчики; *VF1* – натекаватель газа; *VP1–VP3* – вентили; *VT1–VT3* – затворы.

Рисунок 1.1 – Типовые схемы вакуумных систем

Перед запуском любой вакуумной системы требуется закрыть все вентили и подать воду на охлаждение установки. Затем включается механический форвакуумный насос, и открываются вентили *VII1* и *VII2*. После обеспечения в системе давления равного давлению запуска диффузионного насоса ($P_2 = 10$ Па), можно включить диффузионный насос *ND1*.

По истечении 45-50 минут диффузионный насос выйдет на рабочий режим и в его объеме разовьется вакуум порядка 0,01 Па. Затем закрывается вентиль обводной откачки камеры *VII2* и открывается высоковакуумный затвор *VT1*. По истечении 5-10 минут в вакуумной камере реализуется давление 0,01 Па, достаточное для проведения последующих операций.

1.3 Единицы измерения давления и потока

Наиболее распространенными единицами измерения давления считаются Па (Паскаль), мм рт.ст. (миллиметр ртутного столба) и атм. (атмосфера). В научной литературе принято пользоваться международной системой единиц и измерять давление в Паскалях.

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 1 \text{ торр} = 133,3 \text{ Па};$$

$$1 \text{ Па} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ торр} \approx 10^{-2} \text{ торр};$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}.$$

Величина потока газа Q представляет собой некий объем газа, удаляемого из вакуумной системы при давлении P со скоростью откачки S . Величина потока определяется соотношением:

$$Q = PS, \quad (1.1)$$

где S – скорость откачки единицы объема газа в единицу времени. На практике скорость откачки измеряют в литрах, сантиметрах или кубических метрах в секунду или в час:

$$1 \text{ см}^3 \text{ атм/с} = 0,76 \text{ торр л/с};$$

$$1 \text{ см}^3 \text{ атм/час} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ торр л/с};$$

$$1 \text{ торр л/с} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ Па м}^3/\text{с} = 1,32 \text{ Вт}.$$

В последнее время в качестве единиц измерения потока газа

используется килограмм в секунду и ватт.

1.4 Режимы течения газа

Известно несколько режимов течения газа в зависимости от их применения (ламинарный, турбулентный, дозвуковой, сверхзвуковой) и т.д. В вакуумной технике преобладают три режима течения газа в зависимости от давления P и поперечных размеров d вакуумных коммуникаций: *вязкостный*, *молекулярно-вязкостный* и *молекулярный*. В таблице 1.1 представлены критерии оценки режимов течения газа.

Таблица 1.1 - Режимы течения газа

Режим	Число Кнудсена	Pd - Па·м, мм рт.ст.·см
Вязкостный	$10^3 - 5 \cdot 10^{-3}$	$Pd > 1,33$
Молекулярно-вязкостный	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5$	$1,33 < Pd < 0,15$
Молекулярный	$> 1,5$	$Pd < 0,015$

Число Кнудсена определяется по соотношению:

$$Kn = \lambda / d, \quad (1.2)$$

где λ – длина свободного пробега молекулы. Если давление выражено в мм рт. ст., то длина свободного пробега в метрах определится соотношением:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-5} / P.$$

1.5 Проводимость вакуумных коммуникаций

При уменьшении давления хаотичное, равновероятное движение молекул вызывает сопротивление откачке, снижая пропускную способность U вакуумных коммуникаций и скорость откачки объекта S_o . При последовательном соединении отрезков коммуникаций складываются величины, обратные пропускной способности, сопротивление откачке возрастает (проводимость уменьшается)

$$U = \frac{1}{\sum (1/U_i)} \quad (1.3)$$

При параллельном соединении элементов трассы сопротивление уменьшается (проводимость возрастает).

$$U = \sum U_i$$

Пропускная способность возрастает при увеличении температуры и уменьшается при уменьшении молекулярного веса газа.

$$U = U_o \sqrt{T/m} \quad (1.4)$$

В таблице 1.2 приведены формулы расчета пропускной способности в системе СИ. (Размерность единиц: среднее давление на концах трубопровода P^* в Па, диаметр d и длина трубопровода L в метрах, проводимость в $\text{м}^3/\text{с}$). При молекулярном режиме истечения газа, если диаметр отверстия выражен в сантиметрах, пропускную способность удобно определять по формуле:

$$U_m = 9,1d^2,$$

где U – л/с; d – см.

Таблица 1.2 – Некоторые соотношения для расчета пропускной способности в системе СИ

Режим	Трубопровод	Отверстие ($L < 0,1d$)
Вязкостный $Pd > 1,33$	$U_v = 1,36 \cdot 10^3 P^* d^4 / L$	$U_v = 157 d^2$
Молекулярно-вязкостный	$U_{mv} = U_v + 0,8 U_m$	$U_{mv} = U_v + 0,8 U_m$
Молекулярный $Pd < 0,015$	$U_m = 121 d^3 / L$	$U_m = 91 d^2$

Для более точных оценок следует пользоваться связью расхода газа Q с пропускной способностью U и разностью давлений на концах

трубопровода, справедливой для любых режимов течения газа и любых профилей каналов для газа:

$$Q = U(P_1 - P_2). \quad (1.5)$$

Ловушки паров масел могут снижать проводимость наполовину. Для большинства практических случаев пропускная способность стандартных ловушек масел составляет 3 л/с на см² площади поверхности.

В таблице 1.3 приведена пропускная способность трубопровода U (л/с) в зависимости от давления и радиуса трубы R (см) для длины $L=1$ м.

Таблица 1.3 - Пропускная способность трубопровода

P , мм рт ст	$R=1$	$R=2$	$R=3$	$R=4$
1	30	476	2480	7566
10^{-1}	3,9	54,7	263	826
$5 \cdot 10^{-2}$	2,14	26,4	121	362
10^{-2}	1,26	12,4	49,9	137
10^{-3}	0,9	8,23	28,4	69,5

1.6 Основное уравнение вакуумной техники

В вакуумной системе при постоянном давлении достигается баланс между количеством поступающего и откачиваемого потока

$$Q = P_H S_H = P_O S_O = U(P_O - P_H), \quad (1.6)$$

где индексы «н» и «о» относятся соответственно к насосу и к объекту откачки.

Из этого уравнения можно выразить скорость откачки объекта S_o и необходимую скорость насоса S_n :

$$S_o = U(P_o - P_n) / P_o,$$

$$S_n = U(P_o - P_n) / P_n.$$

Продолжая преобразования, получим *основное уравнение вакуумной*

техники:

$$1/S_O = 1/S_H + 1/U. \quad (1.7)$$

Из основного уравнения вакуумной техники следует, что скорость откачки объекта всегда меньше скорости откачки насоса.

1.7 Технология получения вакуума

В основе работы откачных средств лежат следующие физические принципы:

- принцип механического увлечения объема захваченной порции газа (реализуется в механических вакуумных насосах);
- принцип захвата молекул движущейся поверхностью (так называемые турбомолекулярные насосы);
- захват газа струей жидкости или пара (эжекторные, пароструйные, диффузионные насосы);
- ионизация газа с последующим увлечением заряженных частиц (электроразрядные, ионные насосы);
- поглощение частиц (сорбционные насосы).

К основным характеристикам вакуумных насосов относятся:

- предельное давление, $P_{пр}, Па$;
- быстрота действия, $S_H, м^3/с$;
- производительность, $P_H, м^3 \cdot Па/с$;
- наибольшее давление запуска, $P_{зап}, Па$;
- наибольшее рабочее давление, $P_{вх.мах}, Па$;
- наибольшее выпускное давление, $P_{кр}, Па$;
- наименьшее рабочее давление, $P_M, Па$.

Предельное или остаточное давление насоса - это минимальное давление, которое может обеспечить насос, работая без откачиваемого объекта.

Быстрота действия насоса - это объем газа, удаляемый насосом в единицу времени через входной патрубок при давлении $P_{вх}$

Производительность вакуумного насоса характеризует расход газа во входном сечении насоса при данном давлении

$$P_n = S_n \cdot P_{вх}.$$

Наибольшее давление запуска насоса - это то наибольшее давление в его входном сечении, при котором насос может начать работу. Наибольшее рабочее давление насоса - это то наибольшее давление в его входном сечении, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия.

Наибольшее выпускное или критическое давление - максимальное давление в выходном сечении насосе, при котором он может осуществлять откачку.

Наименьшее рабочее давление - это минимальное давление, при котором насос длительное время сохраняет номинальную быстроту действия. Наименьшее рабочее давление примерно на порядок выше предельного давления.

Механические вакуумные насосы

Механические форвакуумные насосы начинают откачку с атмосферного давления. На рис. 1.2 представлены конструкции золотникового (а) и пластинчато-роторного (б) насосов.

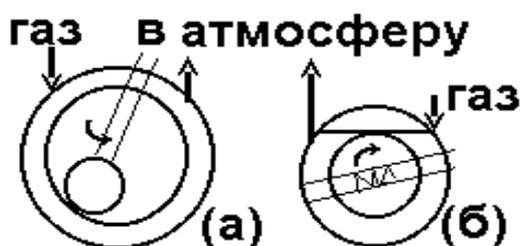


Рисунок 1.2 – Конструкции механических вакуумных насосов

Дополнительный напуск газа в *газобалластное устройство* изменяет соотношение давления насыщенных паров трудно откачиваемых газов (пары воды, бензин и др.). Это предотвращает конденсацию паров внутри насоса.

Предельный вакуум механических насосов при давлениях менее 1 Па ограничен плотностью прилегания элементов и тепловой скоростью молекул. На рис. 1.3 представлена зависимость изменения объема камеры

насоса V от угла поворота ротора и зависимости скорости откачки от давления для двухступенчатых (1) и одноступенчатых (2) механических вакуумных насосов.

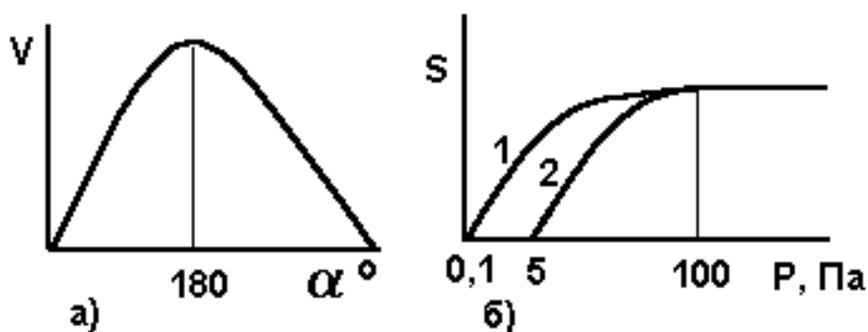


Рисунок 1.3 – а) зависимость объема камеры насоса от угла поворота ротора; б) зависимости стационарной скорости откачки от давления: 1– двухступенчатый насос, 2 – одноступенчатый насос.

Изменение объема камер V от угла поворота ротора пропорционально времени. Мгновенная скорость откачки S_m определится выражением:

$$S_m = dV / dt .$$

Мгновенная скорость откачки насоса намного больше усредненной паспортной.

К маслам для форвакуумных насосов предъявляются два основных требования: малое давление насыщенных паров и определенная вязкость. В настоящее время в производстве нашли применение масла марок ВС-1, ВМ-4, ВМ-1, ВМ-6, АЛКАРЕН-35. Не рекомендуется использовать марки не указанные в паспорте откачного средства.

Конструкция и принцип действия высоковакуумного диффузионного насоса

Высоковакуумные диффузионные насосы различных марок имеют одинаковое принципиальное устройство. Производительность насосов пропорциональна его габаритам.

Схема высоковакуумного насоса Н-2Т, входящего в ряд диффузионных насосов единой серии, приведена на рис.1.4

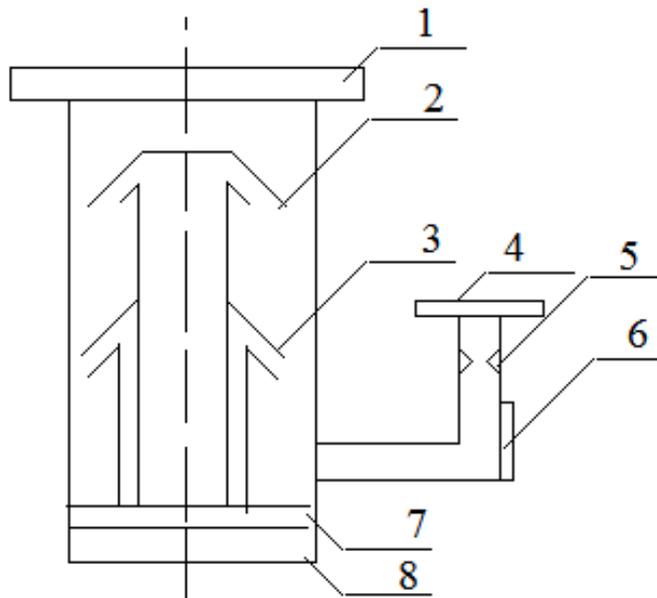


Рисунок 1.4 – Схема высоковакуумного насоса. 1 – посадочный фланец; 2, 3 – сопла; 4 – фланец подключения форвакуумного насоса; 5 – эжекторное сопло; 6 – фланец крепления сопел.

Корпус насоса выполнен из малоуглеродистой стали с наваренной на него рубашкой водяного охлаждения. Паропровод заканчивается двумя зонтичными соплами из алюминия; последней выходной ступенью является эжектор 5. Молекулы газа, поступающие в насос из откачиваемого объема через входной патрубков, диффундируют в струю пара за счет разности парциальных давлений газа в струе пара и вне ее и выносятся струей в сторону выходного патрубка. Таким образом, газ уплотняется от 10^{-3} Па на входе насоса до 10 Па на выходе.

Факторы, влияющие на параметры высоковакуумных насосов

В режиме предельного давления газ на вход насоса не поступает. В насосе устанавливается равновесие между числом молекул, переносимых струей пара из пространства над соплом, и числом молекул, проникающих в результате диффузии через струю пара из объема насоса. При этих условиях

$$P_{np} = P_{вых} \cdot \exp\left(-\frac{V_{пар}}{D_{rn}} L\right),$$

где P_{np} - предельное давление насоса, Па;

$P_{вых}$ - давление на выходе насоса, Па;

$V_{пар}$ - направленная скорость струи пара, м/с;

$D_{гн}$ - коэффициент диффузии газа в паре, м²/с;

L - длина пути диффузии, м.

Отношение $P_{вых}/P_{np}$ называют коэффициентом сжатия диффузионного насоса.

Для случая, когда давление пара значительно больше давления, газа в струе пара, коэффициент диффузии может быть определен по формуле:

$$D_{гн} = 85,1 \cdot 10^{-23} \cdot \left(\frac{M_{г} + M_{пар}}{M_{г} \cdot M_{пар}} \right)^{1/2} \cdot (\delta_{г} + \delta_{пар})^{-2} \cdot T_{пар}^{3/2} \cdot P_{пар}^{-1},$$

где $M_{г}$, $M_{пар}$ - молекулярные массы газа и пара соответственно

$\delta_{г}$, $\delta_{пар}$ - диаметры молекул газа и пара соответственно;

$T_{пар}$ - температура пара, К;

$P_{пар}$ - давление пара, Па.

При использовании в качестве рабочей жидкости масла ВМ-1 или ВМ-5

$$M_{пар} = 450 \text{ и } \delta_{пар} = 10 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

При номинальной мощности подогревателя насоса температура масла и пара равна 473 К, давление пара масла при этом соответствует 66 Па, а скорость пара 200 м/с.

В насосах с зонтичными соплами длина пути диффузии

$$L = (2 - 5) \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Чем ниже давление на стороне выхода из насоса ($P_{вых}$), тем меньшее предельное давление можно получить с помощью данного насоса. Поэтому на практике прибегают к конструированию двух-, трех- и многоступенчатых насосов. Коэффициент сжатия многоступенчатого насоса равен произведению коэффициентов сжатия его ступеней.

Как видно из формулы (2.3), предельное давление зависит от скорости и давления пара. Последнее определяется мощностью подогревателя. При увеличении мощности подогревателя предельное давление должно уменьшаться. Это уменьшение P_{np} связано с уменьшением обратной диффузии газов. При дальнейшем увеличении мощности подогревателя возможно термическое разложение масла, сопровождающееся выделением газообразных продуктов, а также освобождением газов, растворенных в конденсате. Оба этих обстоятельства приводят к увеличению предельного давления насоса. Полное предельное давление должно включать давление паров рабочей жидкости, соответствующее температуре холодильника насоса:

$$\underline{P_{np}} = P_{np} + P_{пар.нас}$$

где $\underline{P_{np}}$ - полное предельное давление;

$P_{пар.нас}$ - давление паров масла при температуре холодильника насоса или при температуре поверхности ловушки, помещенной на входе насосе.

Быстрота действия (или быстрота откачки) высоковакуумного насоса определяется числом молекул газа, падающих в единицу времени на плоскость диффузионной щели. Быстрота действия диффузионного насоса стремится к верхнему пределу, равному

$$S_H = \frac{A \cdot \bar{V}}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{\bar{V}}{V_{пар}}} = \frac{A \cdot \bar{V}}{4} \cdot \chi_0 ,$$

где A - площадь диффузионной щели, m^2 ;

\bar{V} - средняя арифметическая скорость молекул газа, м/с,

χ_0 - вакуум-фактор или коэффициент эффективности диффузионной диаграммы.

Коэффициент χ_0 учитывает способность струи пара захватывать молекулы газа. Обычно χ_0 оказывается порядка 0,1-0,68 (зависит от рода газа и мощности подогревателя).

В реальных условиях быстрота действия, зависит от давления на входе в насос. Типичный график быстроты, действия диффузионного насоса в зависимости впускного давления представлен на рис.1.5.

Весь диапазон рабочих впускных давлений можно условно разделить на три области:

- область предельного давления I
- область постоянной быстроты действия II
- область наибольших рабочих давлений III

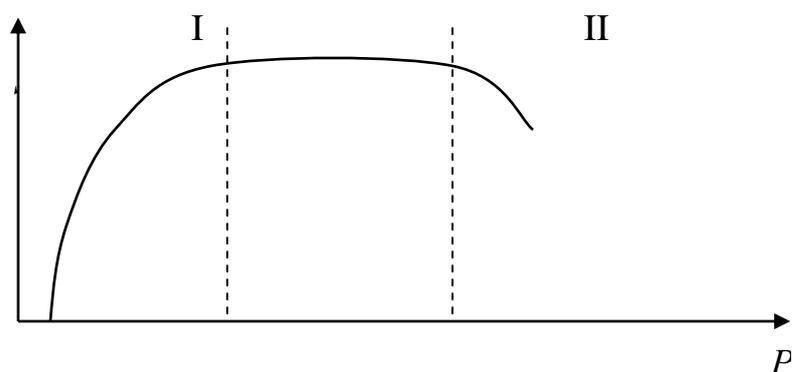


Рисунок 1.5 – Зависимость быстроты действия диффузионного насоса от впускного давления

Вредные процессы наиболее сильно сказываются в I области. Объясняется это тем, что количество газа, забираемое насосом из откачиваемого объема, при малых $P_{вх}$ невелико и соизмеримо с тем количеством, которое проникает в откачиваемый объем за счёт натекания и газоотделения. При входных давлениях, близких к предельному, быстрота действия может быть определена из выражения

$$S_H(P) = \frac{A \cdot \bar{V}}{4} \cdot \chi_0 \cdot \left(1 - \frac{P_{np}}{P_{вх}}\right)$$

С увеличением входного давления количество газа, откачиваемого струей пара, становится все больше и больше в сравнении с тем количеством, которое проникает обратно в откачиваемый объем, что приводит к возрастанию быстроты действия насоса.

При некотором значении $P_{вх}$ количество газа, удаляемое насосом, становится настолько значительным, что влияние вредных процессов оказывается практически незаметным. Поэтому быстрота действия насоса в некотором диапазоне входных давлений (область II) не зависит от величины $P_{вх}$. Горизонтальный участок кривой быстроты откачки бывает выражен более или менее резко в зависимости от конструкции сопла, режима работы насоса. Обычно он лежит в интервале давлений от 10^{-3} до 10^{-1} Па.

Дальнейшее увеличение входного давления (область III) вновь приводит к уменьшению быстроты действия насоса из-за снижения скорости диффузии откачиваемого газа в плотную паровую струю. Струя отражается от стенок корпуса насоса. При этом, естественно, возрастает обратный поток газа, и быстрота действия насоса падает. Работа насоса в этом режиме нестабильна и сопровождается поступлением в откачиваемый объем большого количества пара рабочей жидкости насоса.

При увеличении потока откачиваемого газа растет давление на входе механического насоса и, следовательно, на выходе диффузионного. Чрезмерное увеличение выходного давления диффузионного насоса в свою очередь вызывает появление скачка уплотнения в паровой струе, постепенное отеснение его к плоскости диффузии и, наконец, отрыв паровой струи от стенок насоса. Происходит срыв работа насоса, выражающийся в резком увеличении давления на входе насоса до значения давления на его выходе.

Быстрота действия насоса, как и предельное давление, зависит от мощности подогревателя. С повышением мощности подогрева, начиная с некоторого порогового значения, быстрота действия сначала увеличивается, а затем начинает уменьшаться. Возрастание быстроты действия объясняется тем, что с увеличением температуры масла увеличивается направленная скорость молекул, пара и плотность струи. Спад быстроты действия вызывается тем, что с дальнейшим увеличением температуры испарителя заметно возрастают хаотические тепловые скорости молекул пара (увеличивается плотность паровой опухи), следовательно, и обратное отражение молекул газе в сторону откачиваемого объема. Уменьшению быстроты действия насоса способствуют также процессы термического разложения рабочей жидкости.

Критическое давление насоса зависит от скорости и плотности струи пара рабочей жидкости, определяемых температурой испарителя., т.е. скоростью испарения рабочей жидкости. Чем больше скорость испарения и, соответственно, давление пара $P_{пар}$, тем выше при прочих равных условиях критическое давление насоса. Кроме того, его величина определяется конструктивными особенностями насоса (устройство сопла, расстояние между соплом и корпусом насоса).

1.8 Измерение вакуума

Средства измерения давлений

При давлениях, близких к атмосферному давлению, измерение давлений может производиться на основе изменения деформации гофрированной трубки (деформационные вакуумметры, барометры). При уменьшении давления менее 0,1 атм. широкое распространение получили вакуумметры на основе изменения сопротивления прогреваемых металлических нитей от теплоотода газа (вакуумметры сопротивления блокировочные марки ВСБ-1 с датчиком ПМТ-6 – преобразователь манометрической тепловой). Широкое распространение нашли датчики на основе измерения температуры нити с помощью термопары (термопарные вакуумметры марки ВТБ, ВИТ с датчиками ПМТ-2, ПМТ-4 – преобразователь манометрической термопарный). На рис. 1.6 представлена схема термопарного датчика и вид его градуировочной кривой.

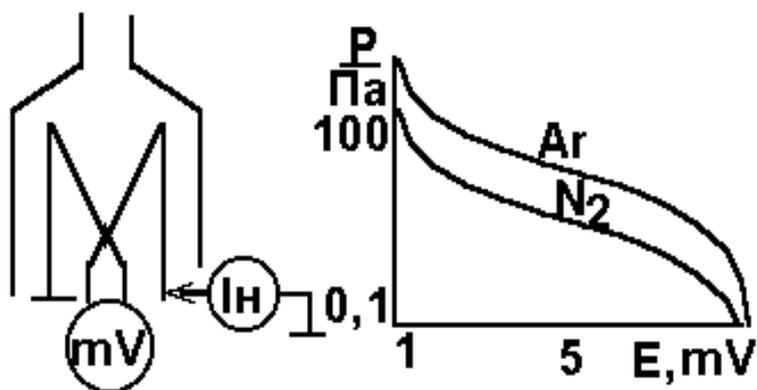


Рисунок 1.6 – Схема термопарного датчика и его градуировочная кривая

Для измерения давления менее 0,1 Па нашли широкое распространение *ионизационные датчики* ПМИ – 2 на основе ионизации газа. Такой датчик устроен по типу трехэлектродной радиолампы (рис. 1.7).

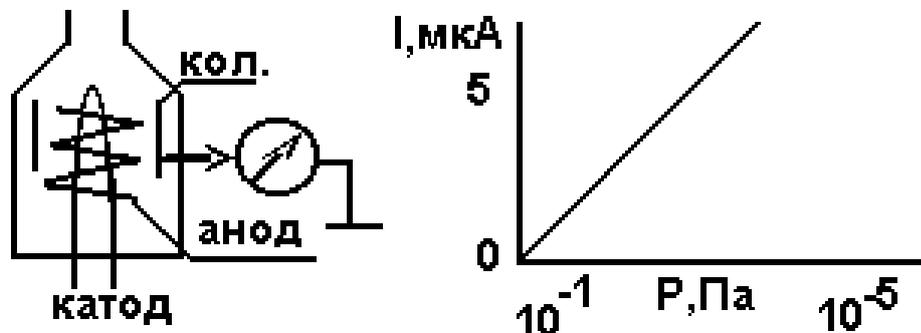


Рисунок 1.7 – Схема ионизационного датчика ПМИ-2 и его градуировочная кривая

Ионизация газа происходит за счет электронов, получаемых с накаливаемого катода. Ионы улавливаются коллектором. Диапазон измерения давлений более 0,1 Па ограничивается перегоранием вольфрамового катода. Для расширения диапазона измерения в сторону более высоких давлений (до 1 Па) используются датчики с иридиево-ториевым катодом. (ПМИ-10 в комплексе с вакуумметром типа ВИ-14). Для измерения давлений от форвакуума (менее 100 Па) до сверхвысокого вакуума (10^{-10} Па) в последнее время применяются *электроразрядные датчики* с вакуумметрами типа ВМЦБ в комплексе с ЭВМ. На рис. 1.8 представлены схемы электроразрядных датчиков и их характеристика. Работа датчиков основана на зависимости тока разряда от давления. Стимулирование разряда проводится магнитным полем или эмиссией электронов с катода.

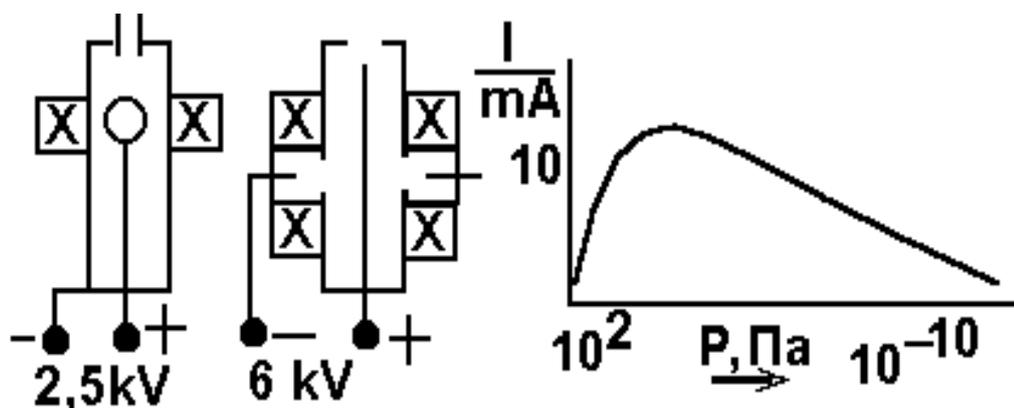


Рисунок 1.8 - Схемы электроразрядных датчиков и типовая зависимость тока разряда от давления

Погрешности при измерении давлений

Несколько одинаковых датчиков, помещенных в одной точке измерения, покажут разное давление вследствие технологического разброса при изготовлении, а также условий хранения.

Чувствительность различных датчиков к роду газа отличается вследствие различий по теплопроводности и коэффициенту ионизации. В табл. 1.4 приведены коэффициенты пересчета чувствительности для некоторых датчиков.

Не рекомендуется проводить измерение вакуума в период горения разряда или испарения материалов и т.п., вследствие десорбции газов из-за нагрева или электронной бомбардировки. В начальный момент измерения происходят процессы обезгаживания элементов датчика.

Таблица 1.4 – Чувствительность некоторых датчиков давления к роду газа

Датчик	Воздух, азот	Водород	Аргон	Углекислый газ
ПМТ-2	1	0,67	1,56	0,94
ПМИ-2	1	0,43	1,29	1,02

2 Расчет вакуумных систем

2.1 Методика расчета вакуумных систем

Расчет вакуумной системы необходим для определения основных ее параметров: требуемой производительности откачных средств и времени откачки до рабочего давления. Количество напускаемого и выделяемого газов должно быть согласовано с возможностями откачных средств.

Суммарный поток газовой выделения складывается из газовой выделения стенок камеры, газовой выделения из изделий, газовой выделения из различных вводов в камеру и потока напускаемого рабочего газа.

Поток газовой выделения с поверхности камеры Q определяется произведением площади поверхности A на коэффициент удельного газовой выделения g и коэффициент поверхности Ω :

$$Q = Ag\Omega. \quad (2.1)$$

Величины удельного газовой выделения приводятся в соответствующей справочной литературе (для стекла и керамики $g=10^{-4}$ Па м³/с с 1 м²). Коэффициент поверхности зависит от качества механической обработки материала (для стали достигает 10). Кроме потока натекания в камеру поступает газ через уплотнения вводов систем индикации параметров, уплотнения токовводов, уплотнения мест сопряжения камеры с вакуумнасосами и др. Таких уплотнений в вакуумной камере не менее 10.

В вакуумной камере всегда имеется более десятка вводов: для датчиков, для термопар, для ввода напряжения и т.д. Поток натекания через такие элементы Q определяется произведением чувствительности течеискателя $\kappa = 10^{-6}$ на их число N .

$$Q = \kappa N. \quad (2.2)$$

Таким образом, суммарный поток газов в вакуумной камере определится выражением:

$$\sum Q = (Ag\Omega)_{\kappa} + (Ag\Omega)_{u} + \kappa N + Q_{\text{нап}}, \quad (2.3)$$

где первое слагаемое относится к камере, второе к детали, третье к течеискателю, четвертое к потоку напускаемого газа. Обычно напускаемый поток составляет 30 – 80 см³ атм/час. Поскольку заводы выпускают оборудование с производительностью в литрах в секунду, то выбранную величину напуска газа следует умножить на переводной коэффициент $2,4 \cdot 10^{-4}$, т.е

$$Q_{нан} = (30-80) \cdot 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ тор л/с.}$$

Необходимая скорость откачки высоковакуумного насоса определится отношением суммарного потока в вакуумной камере Q к рабочему давлению $P_{раб}$, при котором проводится технологический процесс.

$$S_n = \sum Q / P_{раб} . \quad (2.4)$$

Скорость откачки форвакуумного насоса определяется как отношение газового потока на выходе диффузионного насоса Q к выходному давлению диффузионного насоса ($P_{вых}$).

$$S_{\phi} = \sum Q / P_{вых} . \quad (2.5)$$

В большинстве диффузионных насосов выходное давление составляет $P_{вых} = 10 \text{ Па}$ (0,1 мм рт ст). Следует выбрать тот механический насос, который обеспечивает требуемую скорость откачки при давлении 10 Па.

Из основного уравнения вакуумной техники следует, что скорость откачки объекта S_o всегда меньше скорости откачки насоса S_n . При проектировании систем, если проводимость коммуникаций неизвестна, выбирают скорость насоса с коэффициентом запаса γ :

$$S_n = \gamma S_o , \quad (2.6)$$

где $\gamma = 1,25$ для форвакуумных насосов; $\gamma = 2,00$ для высоковакуумных

насосов.

При нестационарном поступлении газа или изменении объема, поток натекания определяется соотношением:

$$Q = d(PV) / dt = PdV / dt + VdP / dt . \quad (2.7)$$

При постоянном объеме камеры поток натекания определится вторым слагаемым.

Время откачки объекта определяется выражением:

$$t = \frac{V \cdot V'}{S_o} \ln \frac{P_1 - \sum Q / S_o}{P_2 - \sum Q / S_n} , \quad (2.8)$$

где V – объем, откачиваемого объекта;

$V' = 10^3$ – приведенный объем;

P_1, P_2 – начальное и конечное давление.

Процесс откачки соответствует изотермическому процессу ($PV = \text{const}$). В расчетах времени откачки в диапазоне давлений, когда существенно возрастают газовыделения (от 10 до 0,01 Па и менее) необходимо учитывать приведенный объем V' , увеличенный пропорционально уменьшению давления. (Например, обеспечение рабочего вакуума от 10 до 0,01 Па соответствует, уменьшению давления на три порядка). Соответственно, приведенный объем составит величину $V' = 10^3$.

При откачке на форвакууме газовыделениями пренебрегают ввиду их малости. Время откачки газа (в секундах) от атмосферного давления ($P_1 = 10^5$ Па) до форвакуумного давления в этом случае время откачки определяют по формуле:

$$t = V / S_o (\ln P_1 / P_2) . \quad (2.9)$$

При откачке газа в диапазоне от атмосферного давления до 133 Па (1 мм рт. ст.) газ достаточно вязкий и проводимость трассы почти не влияет на эффективную скорость откачки. В этом случае время откачки можно рассчитать по формуле:

$$t = 8V / S_n. \quad (2.10)$$

Для расчета времени следует брать сумму нескольких времен:

1 – от атмосферного давления до 1333 Па (1 мм рт ст);

2 - от 133 Па до 10 Па;

3 – от 10 Па до 1 Па.

Для расчета берутся скорости насоса на середине интервала давлений из кривой зависимости производительности насоса от давления. Обычно время откачки объекта на форвакууме составляет до 15 минут.

Обычно на производстве время проведения процесса откачки, включая запуск высоковакуумного оборудования не должно превышать 1 час. Если оно мало – следует корректировать коэффициент поверхности или приведенный объем. Если время проведения вакуумного этапа больше 1 часа - следует корректировать напуск газа и производительность откачных средств. Если система прогревается или имеется плазма, то выбирают насос следующего габарита с большей производительностью, поскольку на один электрон выделяется около десяти молекул газа.

Согласование откачных средств

На практике согласование проводят графически, строя зависимости производительности откачных средств от давления. На рис. 2.1 представлен вариант графического согласования диффузионного и механического вакуумных насосов. В точке согласования выходное давление высоковакуумного насоса равно входному давлению форвакуумного насоса, а скорость откачки форвакуумного насоса меньше паспортной, поскольку она зависит от давления.

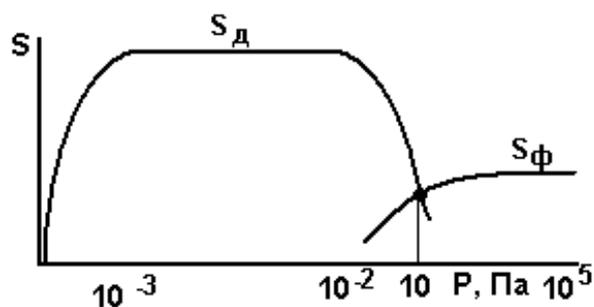


Рисунок 2.1 – Графическое согласование вакуумных насосов

2.2 Методики экспериментального исследования вакуумных систем на герметичность

В числе наиболее часто встречающихся ситуаций следует отметить нарушение герметичности вакуумной системы. Наиболее частыми местами течей являются места проведения профилактических или монтажных работ. Обычно поиск течей следует начинать со снятия распределения давления по последовательно подключаемым элементам вакуумной системы, начиная от откачного средства. На рис. 2.2 представлены варианты распределения давления во времени и характерные для этих случаев неисправности.



Рисунок 2.2 – Кривые откачки для анализа вакуумной системы

Анализ давления проводится как при открытых вакуумных затворах (откачка), так и при закрытых. В случае течи зависимости давления повторяют друг друга. В случае обезгаживания системы, кривые изменения давления не совпадают. Величины потоков натекания или десорбции из анализа кривых откачки рассчитываются по соотношению:

$$Q = V\Delta P / \Delta t , \quad (2.11)$$

где V – объем измеряемой коммуникации

Среди многообразия методов поиска течи наибольшей популярностью пользуются следующие методы: опрессовка, люминесцентный метод, искровой, манометрический, с использованием течеискателя.

Метод опресовки применяется для поиска грубых течей ($Q > 0,05$ тор · л/с). Для опресовки используется мыльная пена и компрессор.

Люминесцентный метод более приемлем для поиска течи в уже отпаянном электровакуумном приборе. Прибор (например, радиолампу) помещают в суспензию с люминофором. По истечении некоторого времени производят засветку подозрительного места с помощью ультрафиолета. Чувствительность метода 10^{-6} Па м³/с.

Искровой метод основан на способности искры высокого напряжения стремиться через места подсоса газа в вакуум. Метод наиболее приемлем для поиска течей в стеклянных вакуумных системах в области форвакуума (1-10 Па).

Манометрический метод основан на изменении давления при смазывании подозрительных мест ваткой, пропитанной в жидкости (ацетоне, спирте). Жидкость, испаряясь в вакуум, повышает давление, что фиксируется датчиком давления.

Поиск течей течеискателями. Область применения течеискателя – это системы высокого и сверхвысокого вакуума. На производстве появился большой ассортимент переносных течеискателей (БГТИ, ТИМ), а также системы автоматизированного контроля вакуума с применением ЭВМ. Расширение набора используемых газов (фреон, шестифтористая сера, четыреххлористый углерод) позволило повысить чувствительность за счет регистрации электроотрицательных ионов. Успешно развиваются ультразвуковые течеискатели, течеискатели с мембранами избирательной проводимости, а также с сорбционными капсулами.

2.3 Тенденции развития вакуумной техники

Активное развитие современных высокотехнологичных областей науки и техники оказывает сильное влияние на развитие смежных и вспомогательных секторов промышленности и технологии. Одной из таких областей является вакуумная техника. Особенно активный импульс развития вакуумная техника получила в последнее время – вместе с

лавинообразным увеличением объемов производства полупроводниковой техники, матриц жидкокристаллических дисплеев, тонких пленок, а также с ростом объемов научно-технологических сегментов, таких как нанотехнология, термоядерная энергетика, ускорительно-накопительные установки и другая электрофизическая аппаратура.

Тенденции развития вакуумных насосов

В последних разработках насосов 2НВР5ДМ изменена конструкция выходного клапана, что позволяет в три раза снизить вылет масла в атмосферу. Для полной очистки выхлопа от паров масел разработан и выпускается фильтр фирмы “Man” (Германия), который обеспечивает степень очистки более 99%. ОАО Вакууммаш разработан откачной пост ПВО -100М на базе агрегата АВДМ -100 с автоматизированной системой запуска.

Для откачки ураносодержащих газов вместо обычно применяемого агрегата типа АВЗ разработаны агрегаты АВПл-20, АВПл-125.

Разработаны диффузионные насосы марки НД -500, НД- 630 Э с предельным давлением $3 \cdot 10^{-5}$ Па и с выходным давлением 60 Па.

Разработаны турбомолекулярные насосы марки БМВВН (безмасляный молекулярно-вязкостный вакуумный насос), работающие от атмосферного давления и не требующие форвакуумного насоса на выходе.

Так, компания ВОС Edwards, один из крупнейших мировых «универсальных» производителей вакуумного оборудования, разработала и запатентовала безмасляный вакуумный насос, построенный на базе комбинации насоса Рутса. Насос позволяет проводить откачку (при использовании вместе с бустером) от атмосферного давления до 10^{-3} торр без дополнительных средств откачки, при этом данный насос толерантно относится к пыли и микрочастицам, прекрасно работает в процессах, где могут быть пары конденсируемых газов, в том числе и агрессивных, и хорошо справляется с большими газовыми потоками, что позволяет активно использовать этот тип насосов в таких областях как выращивание кремния, вакуумная металлургия и ряде других промышленных отраслей, где необходимы надежные решения, способные работать в жестких условиях.

Другой заметной разработкой этой же компании являются революционные безмасляные комбинированные турбонасосы, работающие при любом давлении на входе, начиная от атмосферного, и способные откачивать систему до предельного вакуума 10^{-7} торр.

Нужно отметить, что данные системы также устойчивы к работе в высоконагруженных режимах, могут собираться и интегрироваться в большие «сетевые» вакуумные системы, что позволяет активно использовать их в полупроводниковых производствах.

Другой заметной особенностью развития вакуумного оборудования, характерной и для вышеупомянутого насоса, является стремление не только к определенным параметрам вакуума (достижение заданного давления за короткое время), но и к степени его чистоты от примесей, в первую очередь от паров вакуумных масел, использующихся в механических насосах. Прежде всего это было вызвано появлением новых и развитием существующих областей использования вакуумного оборудования – таких как вакуумная упаковка, плоскопанельные дисплеи (прежде всего FED-типа) и другие высокотехнологичные отрасли, в которых требуется беспримесный вакуум. Это требование послужило толчком для развития целой области устройств, обеспечивающих создание и поддержание безмасляного и/или беспримесного вакуума. Здесь развитие пошло также по двум вышеуказанным направлениям. Были созданы как принципиально новые конструкции, обеспечивающие создание и поддержание чистого вакуума – например, спиральные насосы, в которых изначально нет никакой смазки, так и модифицировались известные конструкции с целью удаления из них масла путем изменения используемых в них материалов – создание пар трения, принципов закрепления движущихся частей – использование магнитных подвесов и т. п.

Активно развивается сектор криовакуумного оборудования, основная часть которого поделена между несколькими активными игроками в этой области – STI Cryogenics Inc. (подразделение Helix Technology Corp.), ULVAC Technologies Inc., Austin Scientific Co. (подразделение Oxford Instruments plc.) и Genesis Vacuum Technologies Inc., причем с сильнейшим перекосом в пользу первой компании, являющейся практически монополистом на американском и имеющей сильнейшие позиции на мировом рынке криовакуумного оборудования прежде всего для полупроводниковой промышленности. Те крупные компании, которые предлагают широкий спектр оборудования, в том числе и в криовакуумном секторе, например Leybold Vacuum GmbH, ведут себя там довольно пассивно, просто предлагая своим потребителям полный спектр вакуумного оборудования. Однако, такая потребность является четко

выраженной, и обусловлено это прежде всего тем, что унификация оборудования в рамках одной продуктовой линейки или одного производителя позволяет существенно снизить затраты на его обслуживание и эксплуатацию. Поэтому одной из тенденций мирового рынка вакуумного оборудования является стремление к унификации и стандартизации своих систем, прежде всего внутри продуктовой линейки компании, с тем, чтобы лучше сочетать элементы различных аппаратов и предлагать потребителям наиболее гибкие и комплексные законченные решения.

Можно отметить следующие тенденции в направлении применения вакуумных систем в промышленности

Надежность оборудования – стойкость к возможным пагубным воздействиям технологического процесса. Сюда можно включить воздействия, связанные как с самим технологическим процессом, например, возможность работы с агрессивными газовыми средами, так и стойкость к проблемам, обусловленным форс-мажорными обстоятельствами – например, аварийное выключение электричества, несоблюдение штатных режимов работы и т. п.

Максимальное невмешательство в технологический процесс – отсутствие примесей, вибрации и прочих воздействий. Требование, становящееся все более актуальным с расширением областей использования вакуумных систем. То есть системы должны быть максимально прозрачными и незаметными для основного технологического процесса и не должны обуславливать необходимость нагружения установки дополнительным предохраняющим оборудованием – ловушки, фильтры и т. п.

Универсальность и расширяемость систем – понятное требование с учетом того, что объемы производства в отраслях, где используется вакуумное оборудование, постоянно и устойчиво растут. Полностью менять нерасширяемую систему на более производительную невыгодно, гораздо проще нарастить мощности уже существующей.

Автоматизация, мониторинг и контроль оборудования – эти требования вытекают из постоянного усложнения и все более увеличивающейся разветвленности вакуумных систем. Проводить исчерпывающий мониторинг и контроль вручную становится практически невыполнимой задачей, отсюда вытекает необходимость максимальной автоматизации установок, снабжения их логическими системами,

способными без участия человека быстро реагировать на возникающие ситуации.

Экологические и эргономические требования – связаны с ужесточением контроля состояния окружающей среды. Надо сказать, что эти требования оказывают влияние даже на базовые подходы к формированию производства. Такие требования послужили одним из толчков к замене парожидкостных систем в химических производствах на безмасляные механические системы, внедряемые, например, компанией ВОС Edwards. Это обусловлено тем, что механические системы не требуют дальнейшей утилизации рабочей жидкости, которая сама по себе является сложным и дорогим процессом. Все большее «приближение» вакуумных систем к человеку – уход от только промышленных областей, обуславливает необходимость развития эргономических характеристик вакуумного оборудования – уменьшение уровня шума, снижение веса, габаритов и т. п.

Тенденции развития вакуумметрии

Тенденция развития средств измерения следует в направлении миниатюризации и вывода сигнала на ЭВМ. В последнее время разработаны вакуумные датчики типа ПДД на принципе тензометрии, позволяющие измерять вакуум от атмосферы до 10^3 Па. Разработаны датчики марки ПДТ (преобразователь давления термопарный) с напыленными термопарами и нагревателями. В таблице 2.1 приведены некоторые перспективные марки вакуумметров.

Таблица 2.1 – Некоторые марки вакуумметров

Марка	Диапазон, Па	Датчик	Производитель
УКВ-3/7-001	10^{-7} - $4 \cdot 10^3$	ПТМ-6-3 ПММ-32	ЗАО Токамак, Петушки Владимирская обл
ВДТБ -10	10^5 – 10^{-3}	ПДТ – 13 ПДД-1	СКТБ ТЭ, С-Петербург
12 ВТС2	10^{-5} - 10^2	ПМТ-2 ПМИ-2	ЗАО Системы контроля, г. Пермь

Среди зарубежных компаний широко известны вакуумметры фирм Varian (приборы Multigage, Multivac), Leybold Vacuum (прибор Membranovac DM-11, Combivac), Alcatel (прибор μ Pascal, вакуумметр ANG 111D), Pfeiffer (вакуумметр IKR 270).

3 Подготовка изделий к технологическим операциям

3.1 Источники загрязнений при производстве приборов

При производстве электронных приборов неминуемо возникают примеси нежелательных газов, материалов или условий, препятствующих проведению процесса. Дым из дымоходов, заводов, транспортных средств или от сжигания древесины и угля приводят к загрязнению воздуха.

Необходимость подготовки изделий под технологические операции вызвана тем, что в приповерхностных слоях материалов располагаются различные солевые и окисные пленки, примеси посторонних веществ, микроорганизмы и т.д. Значительная часть загрязнений заносится от предшествующих заготовительных операций и химических производств. Атомы газов адсорбируются на поверхности материалов (*адсорбция*) и в дальнейшем диффундируют в материал с образованием как химических соединений (*хемосорбция*) так и растворов типа металл-газ (*абсорбция*). При проведении технологических операций эти газы выходят наружу, препятствуют сцепляемости (*адгезии*) пленки с основой, участвуют в деградации поверхностей. Для выбора последовательности технологических операций важно знать, где располагается газ, поскольку прямые и обратные процессы идут одновременно с точностью до констант равновесия.

3.2 Закономерности газовыделения из изделий

Константы равновесия

В металлах находится целый набор газов. Для удаления газа требуется приложить энергию. Существуют табличные константы равновесия “Кр”, характеризующие способность металлов к поглощению или выделению газов в определенной газовой среде. Например, применительно к очистке деталей от воды в водородной печи константа равновесия имеет вид:

$$K_p = P_{H_2O} / P_{H_2}.$$

Константа равновесия почти экспоненциально зависит от температуры. (Например для стекла применительно к обезгаживанию от воды при температуре 100⁰ С Кр=0,1. При температуре 200⁰ С Кр= 1)

Энергия активации процесса

Для прохождения процесса обезгаживания необходимо приложить энергию выше, чем энергия связи. Ниже этой энергии процесс может не происходить. Энергии активации различных процессов являются табличными величинами. В табл. 3.1 представлены энергии, необходимые для испарения некоторых газов для преодоления физической адсорбции с поверхности углерода.

Таблица 3.1 - Энергии активации испарения некоторых газов

Газ	Воздух	Масло	СО	Не	Н ₂ О	СО ₂	Не
$E \times 10^{-6}$ (Дж/кМоль)	5	90	6	0,008	45	25	1,8

При обезгаживании изделий может происходить разложение органических соединений. При этом количество выделившегося газа возрастает. Изменение количества выделившегося газа подчиняется уравнению:

$$Q = C \times n (1 - e^{-kT}),$$

где С- коэффициент поверхности материала;

n- поверхностная концентрация молекул;

К- постоянная скорости реакции разложения, $K = K_0 e^{-E/RT}$,

где K_0 - константа, зависящая от температуры ($T = 200^{\circ} \text{C}$ $K_0 = 1$, при $T = 1000^{\circ} \text{C}$ $K_0 = 2$);

Е- энергия активации;

Р- универсальная газовая постоянная ($R = 8,31 \times 10^{-3}$ Дж/Кх моль = 1,98 кал/моль град).

3.3 Вакуумная гигиена

Окружающая среда существенным образом влияет на качество изготовления электронных приборов. Для обеспечения чистоты воздуха в помещениях предприятий и поддержания его температуры и влажности на необходимом уровне предусматривают комплекс технологических мероприятий и вентиляционные устройства. При этом определяющими в обеспечении чистоты воздуха являются технологические мероприятия.

Для изготовления приборов необходимо соблюдать чистоту, влажность, микроклимат, минимальное присутствие персонала.

Ядовитые газы и пары в концентрациях, превышающих допустимые, вызывают заболевания людей, а в некоторых случаях представляют и опасность для жизни. *Обеспечение чистоты воздуха* как газовой смеси является основной задачей вентиляции. Также важной ее задачей является борьба с загрязнением воздуха различными механическими примесями - пылью. Важным является срок хранения материалов и полуфабрикатов. По степени чистоты и контролируемости атмосферы здания делят на категории:

1 категория. К этой категории относятся сборочные цеха. В их состав входят белые залы и боксы с отсосом пыли из вентиляционных решеток, встроенных в пол. Запыленность таких залов не должна превышать 20 пылинок на 1 литр воздуха. Обязательным является переодевание и переобувание персонала;

2 категория. К этой категории относятся подготовительные к сборке цеха. Запыленность таких цехов не должна превышать 300 пылинок на 1 литр воздуха. Кратность обмена воздуха в таких помещениях должна быть не менее 10;

3 категория - это заготовительные цеха. Они являются основным источником загрязнений. Проезды и пешеходные дорожки должны быть свободны для движения, выровнены и систематически очищаться от мусора. Территория вокруг зданий и проезжей части не должна загромождаться оборудованием, отходами производства, тарой и т. д. Перед входом в корпуса зданий должны быть установлены урны для мусора и оборудованы мойки для мытья обуви. В период с мая по сентябрь при сухой погоде (возможность образования пыли) проезды вокруг помещений должны поливаться водой. Рабочее место станочника должно быть обеспечено всем необходимым для поддержания чистоты: щетками для сметки стружки и подметания пола, крючком или скребком для стружки. Для хранения заготовок, основных материалов деталей и сборочных единиц у рабочих мест должны быть оборудованы стеллажи, подставки или специальная тара. Хранение материалов, деталей, заготовок навалом у рабочих мест, загромождение проходов и проездов запрещаются. В процессе работы исполнитель должен поддерживать чистоту и порядок на рабочем месте в течение смены: здесь не должно быть посторонних предметов, не относящихся к выполняемой работе.

Металлическая стружка, мусор и отходы производства на рабочих местах должны быть убраны по мере накопления.

В течение рабочего дня и после окончания смены должна производиться уборка от мусора проходов и проездов. Удаление пыли с кран-балок, воздухопроводов вентиляционных систем - один раз в год, в металлургических цехах - два раза в год. Световые окна, фонари очищать от пыли один раз в два года. Курить во всех помещениях, а также на территории предприятия запрещается, кроме специальных и оборудованных мест. Прием и хранение пищи на производственных и вспомогательных площадях запрещаются.

Очистка воздуха для технологических целей

Для очистки воздуха нашли широкое применение полимерные, слоистые фильтры, устанавливаемые на входах в помещения. Внутри помещений применяются электростатические фильтры и фильтры на основе коронного разряда. На предприятиях с участием санэпиднадзора медицинских учреждений, служб охраны труда должен быть разработан конкретный комплекс медико - биологических профилактических мероприятий с учетом характера работы и сопутствующих факторов производственной среды.

Мерами борьбы с производственной пылью являются: рационализация производственных процессов, организация общей и местной вентиляции, замена токсичных веществ нетоксичными, механизация и автоматизация процессов, влажная уборка помещений и др. кроме того, применяются средства индивидуальной защиты: респираторы, фильтрующие противогазы, защитные очки, специальная одежда из пыленепроницаемой ткани.

Следует отметить, что в случае квазипериодической работы вакуумных установок, при разгерметизации вакуумная камера работает подобно пылесосу. Для пневматических и вакуумных систем воздух следует готовить. На рис. 3.1 представлена последовательность подготовки воздуха для систем пневмоавтоматики, робототехники и вакуумных систем

фильтр → ресивер (10 атм) → дроссель (слив H_2O) → осушитель (эл. дуга)

Рисунок 3.1 - Последовательность операций по подготовке воздуха

4 Пленочная технология

4.1 Назначение и типы пленок

В настоящее время пленки различных материалов применяются в качестве покрытий различного назначения (декоративные, антикоррозионные, диэлектрические, упрочняющие и многие другие). В зависимости от назначения пленки и условий ее эксплуатации пленки наносят различными способами. Это получение пленок из растворов, а также методами напыления в вакууме и при атмосферном давлении, методами осаждения из паров солей и аэрозолей при градиенте температур, методами распыления материалов ионной бомбардировкой и т.д. В зависимости от конкретных условий осаждения, пленки одного и того же вещества подразделяются на 4 типа:

- 1) аморфные - характеризующиеся пористой структурой, отсутствием кристаллической решетки. Подобные пленки имеют очень большое поверхностное сопротивление;
- 2) мелкозернистые (размер кристаллов менее 100 ангстрем);
- 3) крупнозернистые, с размером зерен более 100 ангстрем;
- 4) монокристаллические (эпитаксиальные). Пленки этого типа представляют собой кристаллическую решетку атомов данного материала и обладают малым сопротивлением.

4.2 Методы синтеза пленочных материалов

Среди большого разнообразия методов получения пленок наибольшее распространение получили пленки, получаемые следующими способами:

- 1) напыление пленок методом термического нагрева и испарения материалов в вакууме. По способу нагрева испарителя термовакуумное испарение подразделяют на токовое, электронно-лучевое, лазерное, с использованием СВЧ нагрева и др.;

- 2) напыление пленок может осуществляться в разряде при ионном распылении материала катода (катодное распыление). Разряд может быть стимулирован продольным магнитным полем (нанесение пленок в разряде Пеннинга) или скрещенным магнитным и электрическим полями (магнетронное напыление). Следует отметить, что этому методу присуща

более низкая, по сравнению с термическим методом, скорость нанесения пленки;

3) напыление пленок может производиться из материала электродов, испаряемых при горении дугового разряда.

4.3 Термовакuumное формирование пленок

Среди множества методов изготовления пленок наибольшее распространение получил метод термического испарения материалов в вакууме. На рис. 4.1 представлены схемы реализации некоторых методов термовакuumного нанесения пленок. Процесс токового испарения пленки (рис. 4.1, а) происходит следующим образом.

В камере достигается давление, достаточное для пробега молекулами пара размеров камеры ($\sim 10^{-2}$ Па). В процессе откачки газа включается нагреватель (Н) и проводится прогрев и обезгаживание подложки (П), затем происходит нагрев испарителя (И) с расположенной на нем навеской. После этого, с помощью электромагнита, открывается заслонка (З) и материал пылится на подложку через трафарет.

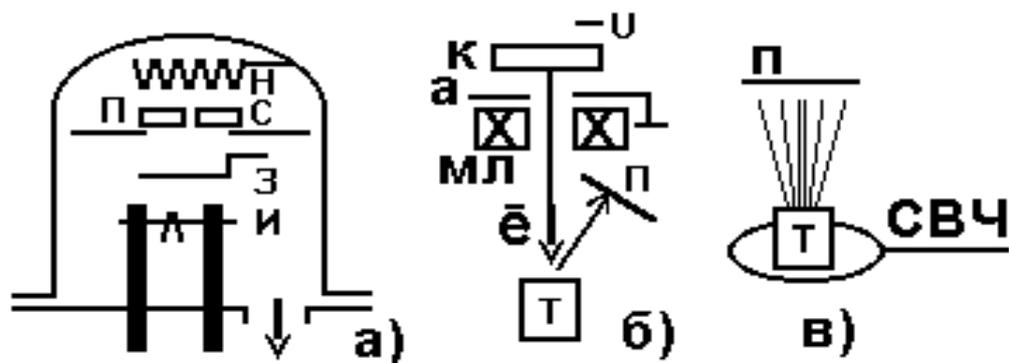


Рисунок 4.1 - Схемы термовакuumного испарения пленок

О толщине напыления свидетельствует расположенное рядом с подложкой стекло, называемое свидетелем (С).

Эффективность процесса напыления определяется прежде всего малым временем осаждения (не более 1-2 минут в пересчете на одну подложку) и равномерностью толщины пленки по поверхности подложки. В соответствии с этим при организации и отладке процесса должны быть обеспечены:

- интенсивное испарение вещества из испарителя;

- прямолинейное движение молекул вещества преимущественно на подложку и при достаточно равномерном облучении подложки;
- интенсивный и равномерный рост пленки по поверхности подложки.

В связи с этим процесс термического вакуумного напыления целесообразно представить в виде трех последовательных стадий: испарение, перенос вещества к подложке и конденсация.

Главное достоинство этого метода – его универсальность, т.е. возможность получать на одной и той же вакуумной установке всю пассивную часть пленочной микросхемы, состоящую из слоев металлов, сплавов и диэлектриков, имеющих различные толщину и конфигурацию. В установках промышленного типа предусмотрена возможность многократного напыления без разгерметизации рабочей камеры. Для этого создаются карусели подложек и испарителей, способные перемещаться в вакууме относительно друг друга. Наличие каруселей позволяет, испаряя различные вещества с разных испарителей, получать многослойные тонкие пленки.

Нагрев резистивным способом обеспечивается за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока непосредственно через напыляемый материал или через испаритель, в котором он помещается. Конструктивно резистивные испарители подразделяются на проволочные, ленточные и тигельные. Способ применяется при испарении материалов, температура нагрева которых не превышает 1500°С

Резистивный нагрев используемый во многих испарительных установках, имеет несколько существенных недостатков: загрязнение от нагревателя, тигля, ограничения по относительно низкой мощности нагревательных элементов. Это не позволяет напылять чистые пленки и испарять материалы с высокой температурой плавления.

Материалы испарителя должны удовлетворять следующим требованиям:

- давление пара материала испарителя при температуре испарения должно быть пренебрежимо мало по сравнению с упругостью пара напыляемого вещества;
- материал испарителя должен хорошо смачиваться расплавленным напыляемым металлом с целью обеспечения хорошего теплового контакта и равномерного потока пара;

– химическое взаимодействие между контактирующими материалами, обуславливающее загрязнение покрытий и разрушение испарителей, должно отсутствовать. Существует таблица совместимости испарителя и навески.

Многие материалы не испаряются, а создают твердые растворы с испарителем, либо испаряются без образования жидкой фазы (сублимируют). Это затрудняет контроль процесса

Лодочки, или держатели для резистивного нагрева изготавливаются из тугоплавких металлов, которые могут нагреваться при прохождении через них электрического тока - это вольфрам, тантал, платина, графит.

На рис. 4.1, б представлена схема электронно-лучевого испарения. На катод (К) электронно-лучевой пушки подается отрицательный потенциал. Электроны устремляются в направлении анода (а), фокусируются магнитной линзой (МЛ) и попадают в тигель (Т). Пары материала формируются на подложке (П). Испарение электронным лучом лишено недостатков присущих резистивному нагреву.

Механизм электронно-лучевого испарения: посредством нагрева нити накала которая служит катодом, происходит термоэмиссия электронов, причем нить накала располагается не на одной линии с подложкой, таким образом, устраняется появление в пленке примесей от материала катода.

Лучшие результаты при напылении получаются, если испаряемый материал разместить в небольшом углублении охлаждаемого водой медного нагревателя. Электронный ток силой 100—500 мА эмитируется вольфрамовой нитью накала, находящейся вне поля прямого видения со стороны испаряемого вещества, и ускоряется высоким напряжением 3—10кВ. Электронный луч с помощью магнитного поля направляется на маленький участок испаряемого вещества, которое локально плавится (рис). Некоторые соединения перед испарением подвергаются диссоциации и от испарителя в первую очередь отделяется компонент, который имеет более высокое давление пара. Для преодоления этого эффекта различные компоненты соединения испаряются из отдельных источников со скоростями, соответствующими молекулярному составу конденсата.

В некоторых методах испарения используют обработку ионным лучом подложки для улучшения качества пленки. В этом случае ионная пушка, генерирующая ионы с энергией порядка нескольких кэВ,

применяется в сочетании с испарительным источником. В основном используются ионы инертных газов (например, Ar^+ или O^+_2), которые при контакте с поверхностью модифицируют пленочную структуру и состав, делая пленку более прочной и устойчивой.

На рис 4.1, в представлена схема испарения пленок на основе СВЧ нагрева. Одно из достоинств этого метода заключается в возможности испарения дозированной навески без дорогостоящего тигля (“на лету”) в условиях конвейерного производства.

Эффективность распыления можно значительно повысить, если между анодом и катодом-мишенью подать переменное напряжение частотой порядка 10 МГц (обычно используют частоту 13,56 МГц, разрешенную для технологических установок, работающих в этом частотном диапазоне). Повышение эффективности при высокочастотном распылении объясняется следующим образом. Масса электронов значительно меньше массы ионов. Поэтому, обладая значительно большей подвижностью, электроны успевают следовать за быстроменяющимся полем, переходя с одного электрода на другой. Ионы, будучи гораздо менее подвижными, не успевают заметно перемещаться в межэлектродном пространстве, в результате чего там образуется объемный положительный заряд ионов. Кроме того, количество электронов, поступающих на мишень за полпериода, значительно превышает то количество, которое необходимо для нейтрализации заряда ионов на мишени. В результате на диэлектрической мишени скапливается отрицательный заряд электронов. Все это приводит к появлению в межэлектродном пространстве дополнительного электрического поля, которое способно ускорить часть ионов до больших энергий, что и увеличивает эффективность распыления мишени.

Лазерное испарение материалов в вакууме

В последнее время широко применяется испарение материалов лазером (метод лазерной абляции). Лазерное излучение обеспечивает самую высокую плотность энергии на распыляемой поверхности. Это ставит метод лазерной абляции практически безальтернативным методом получения сложных оксидных систем, в состав которых входят элементы с различными коэффициентами распыления. Этот метод успешно применяется для получения многокомпонентных оксидных систем. Данная методика получения различного рода сложных пленочных структур

приобрела популярность после первого удачного ее применения для роста тонких пленок сверхпроводников в 1987 г.

Лазерная абляция - метод удаления вещества с поверхности лазерным импульсом.

При низкой мощности лазера вещество испаряется или сублимируется в виде свободных молекул, атомов и ионов, т.е. над облучаемой поверхностью образуется слабая плазма, обычно не светящаяся (этот режим часто называется *лазерной десорбцией*). При плотности мощности лазерного импульса, превышающей порог режима абляции, происходит микровзрыв с образованием кратера на поверхности образца и светящейся плазмы вместе с разлетающимися твёрдыми и жидкими частицами (аэрозоля). Режим лазерной абляции иногда также называется *лазерной искрой*.

Мощный лазер располагается снаружи установки. При помощи оптической системы лазерный луч направляется в камеру и фокусируется на мишени или элементе микросхемы. Говоря простыми словами, лазерная абляция – это процесс быстрого плавления и испарения материала мишени, при использовании высокоэнергетического лазерного излучения, с последующим переносом материи от мишени к подложке в вакууме. Глубина проникновения лазерного луча в поверхность мишени может регулироваться от 10 нм до десятых долей миллиметра. Это означает, что тонкий поверхностный слой материала может подвергаться воздействию излучения в то время, как оставшаяся часть мишени остается незатронутой. Таким образом, лазерная абляция является неравновесным процессом. Говоря о ее достоинствах, можно отметить, что лазерная абляция – один из наиболее быстрых методов получения тонкопленочных покрытий, он предоставляет четко ориентированное направление распространения плазмы, наряду со стехиометрическим переносом материи от мишени к подложке.

4.4 Условия, влияющие на формирование пленки при термовакуумном напылении

При напылении пленок необходимо выполнить несколько условий, существенно влияющих на конденсацию пленок. Основные условия из них следующие.

1. Соотношение между давлением остаточных газов и давлением насыщенных паров. Оно влияет на количество газа, содержащегося в пленке. В последнее время развиваются методы импульсного напыления, при которых роль остаточной атмосферы минимальна.

2. Степень разрежения. Глубина вакуума влияет на среднюю длину свободного пробега молекул, которая приблизительно рассчитывается по формуле:

$$L=0,63 \times 10^{-3}/P,$$

где L - в м, а P - в Па

Глубина вакуума влияет на степень загрязнения пара окислами, карбидами, нитридами и прочими соединениями. Установлено, что для напыления качественных пленочных проводников, резисторов, индуктивности и емкостей достаточны условия technically высокого вакуума, а для получения полупроводниковых пленок необходимы условия сверхвысокого вакуума 10^{-7} - 10^{-10} Па.

3. Структура поверхности подложки. Степень шероховатости и загрязнение подложки препятствуют сплошности роста конденсата пленки, препятствуют адгезии. Пленки придают хороший вид изделиям при предварительной обработке изделий до уровня зеркальной полировки (12-14 класс).

Таким образом, способы улучшения качества пленок сводятся в первую очередь к увеличению скорости напыления, подготовке подложки, уменьшению давления газа.

4.5 Получение пленок равномерной толщины

Обычно толщина пленки распределяется по закону косинуса относительно оси испарителя. В ряде случаев при напылении больших поверхностей, или ответственных покрытий требуется малый разброс толщины (~2%). Для обеспечения равномерности прибегают к увеличению расстояния между подложкой и испарителем, применению нескольких испарителей, к вращению подложки или диафрагмированию потоков.

При увеличении расстояния между испарителем и подложкой кривая распределения толщины “расплывается”. Однако увеличение равномерности в этом случае достигается потерей скорости напыления.

Применение нескольких испарителей удорожает стоимость напыления за счет дорогостоящего испарителя. Перемещение подложки в процессе напыления несколько ухудшает адгезию пленки. Диафрагмирование потоков пара находит применение при изготовлении приборов в лабораторных условиях.

4.6 Адгезия пленок

Степень сцепления пленки с поверхностью называется адгезией. На сегодняшний день эта тема является предметом неустанный внимания исследователей и эксплуатационников.

Методы оценки адгезии

В настоящее время общепризнанными являются три метода оценки адгезии:

- царапание ногтем или абразивной резиной;
- изгибание с последующей проверкой на шелушение;
- измерение усилия на отрыв приклеенной или приваренной к пленке площадки размером 1 см^2 .

Наибольшее распространение получил метод измерения на отрыв. Неплохой считается адгезия на полимерах $\sim 15 \text{ кг/см}^2$, на металлах $\sim 50 \text{ кг/см}^2$.

В числе условий, влияющих на адгезию можно назвать:

- 1) наличие механических напряжений вследствие разных коэффициентов линейного расширения пленки и подложки;
- 2) наличие промежуточных слоев газа и загрязнений между пленкой и подложкой;
- 3) проникновение паров воды под пленку в процессе эксплуатации;
- 4) деградация приповерхностного слоя подложки с течением времени (особенно это относится к стеклу).

Оптимальная толщина пленки, соответствующая максимальной адгезии, различна для различных материалов и колеблется в пределах 150-200 ангстрем.

Наличие загрязнений на подложке оказывает существенное влияние на адгезию и на электрофизические свойства пленок, поэтому перед осаждением необходимо тщательно очищать подложки и защищать их от масляных пленок, которые могут возникнуть в результате миграции паров рабочих жидкостей из насосов. Эффективным способом очистки является ионная бомбардировка поверхности подложки в плазме тлеющего разряда. Для этой цели в рабочей камере вакуумной установки обычно предусматриваются электроды, на которые от маломощного высоковольтного источника подается напряжение в несколько киловольт током до нескольких ампер. Электроды чаще всего изготавливаются из алюминия, поскольку среди металлов он имеет самую низкую скорость катодного распыления.

Методы повышения адгезии

Метод подслоя. Адгезия пленки в очень сильной степени зависит от наличия окисного слоя, который может возникнуть в процессе осаждения между пленкой и подложкой. Такой окисный слой образуется, например, при осаждении железа и никрома, чем и объясняется хорошая адгезия этих пленок. Пленки из золота, которое не подвержено окислению, имеют плохую адгезию, и поэтому между золотом и подложкой приходится создавать промежуточный подслой из материала с высокой адгезией (хрома или его сплава, никеля, ванадия и др.) Желательно, чтобы образующийся слой окисла был сосредоточен между пленкой и подложкой. На образование окислов сильное влияние оказывает состав остаточных газов в рабочем объеме установки и в особенности наличие паров воды. В настоящее время пока нет однозначной теории увеличения адгезии за счет подслоя. Считается, что материал подслоя должен иметь хорошую растворимость в пленке и подложке, либо иметь большую энергию связи с поверхностью.

Метод вспышки. Для уменьшения количества газа под пленкой в ряде случаев навеска сбрасывается на уже нагретый испаритель. Этим, так называемым, методом вспышки достигается превышение концентрации паров над концентрацией остаточного газа. Разновидностью этого метода является импульсное электронно-лучевое и импульсное взрывное лазерное испарение.

Взрывное испарение применяется для напыления пленок из многокомпонентных материалов (сплавов или смесей) с различным давлением насыщенных паров компонент.

Метод отжига и вжигания пленок. Отжиг пленок применяется для снятия термических напряжений после напыления. Для большинства пленок на стеклоподобных материалах отжиг проводится при температурах $\sim 250^{\circ}\text{C}$. В течение 15-30 минут. Повышение температуры может привести к изменению спектра десорбированных газов и к отравлению пленки. Вжигание пленок проводят при максимально возможных температурах. В этом случае молекулы входят на границу режима поверхностной диффузии, а пленка спекается с поверхностью. Следует отметить, что при отжиге или вжигании может уменьшиться технологическая толщина пленки, поэтому напыление проводят с запасом. Отжиг и вжигание пленок лучше проводить в вакууме с добавлением инертных газов.

Метод ускорения молекул. Молекулы лучше пристают к поверхности, если им придана скорость больше тепловой. К таким методам относятся специальные методы нанесения пленок, заключающиеся в ионизация паров и ускорение ионов электрическим полем с последующим вбиванием в поверхность (ионная имплантация).

Оксидные пленки. Это в основном диэлектрические пленки, применяемые в декоративной технологии, а также для изоляции между слоями микросхем.

Оксидные пленки могут быть получены:

- 1) в парах воды (при давлении 760мм рт ст или более);
- 2) в газовом разряде ($0.1 \text{ мм рт ст } \text{Ar}+5\%\text{O}_2$);
- 3) оксидирование в кислороде (в печь подается O_2 или CO_2).

4.7 Измерение скорости напыления и толщины пленок

Скорость напыления пленки и ее толщина взаимосвязаны. Зная толщину пленки можно определить скорость ее конденсации на подложке.

Толщину пленок в настоящее время измеряют самыми различными методами.

Ряд методов основан на микровзвешивании, на изменении электрической емкости напыляемых конденсаторов. Оптические методы основаны на пропускании света, на интерференции. Используются также контроль электрического сопротивления пленок, наведенные вихревые

токи и т.д. К средствам измерения скорости напыления и толщины пленок предъявляется ряд требований:

- 1) минимальная погрешность измерения;
- 2) независимость измерений от состава среды;
- 3) одновременность измерения скорости напыления и толщины пленки;
- 4) пригодность для различных пленок.

Свойства тонких пленок очень чувствительны к технологии их изготовления. Пленки, имеющие одинаковую толщину, в зависимости от условий их получения могут иметь совершенно различные удельные сопротивления, температурные коэффициенты сопротивления, диэлектрические потери, коэффициенты поглощения света и т. п. Поэтому в технологии часто более важно не измерение толщины пленки после ее получения, а возможность управлять толщиной в процессе нанесения.

Следует отметить, что измерение пленок дает большую погрешность даже в пределах одного типа пленки. Одна пленка, измеренная разными способами, будет иметь разную толщину. Для устранения таких противоречий ввели *понятие истинной и технологической толщины пленок.*

Истинная и технологическая толщина пленок

Ранее отмечалось, что пленки бывают аморфные, мелко и крупнозернистые, а также эпитаксиальные. Пленки обладают разной плотностью, разным сопротивлением. Будучи напыленными одним количеством вещества и имея одинаковую массу, они обладают одной истинной толщиной, но пригодны для различных целей. Заказчики пленок пользуются технологической толщиной и заказывают тип пленки, ее толщину и методы измерения. Этим уменьшается погрешность в измерениях между заказчиком и изготовителем. Истинная толщина пленки - это толщина, которую обеспечивает изготовитель. Технологическая толщина – это толщина, при которой пленка выполняет потребности заказчика.

4.8 Методы измерения параметров напыления

На рис. 4.2 представлены схемы реализации методов измерения толщины пленок, по изменению сопротивления (рис. 4.2, а), по изменению емкости (рис. 4.2, б), по просвету пленки (рис. 4.2, в).

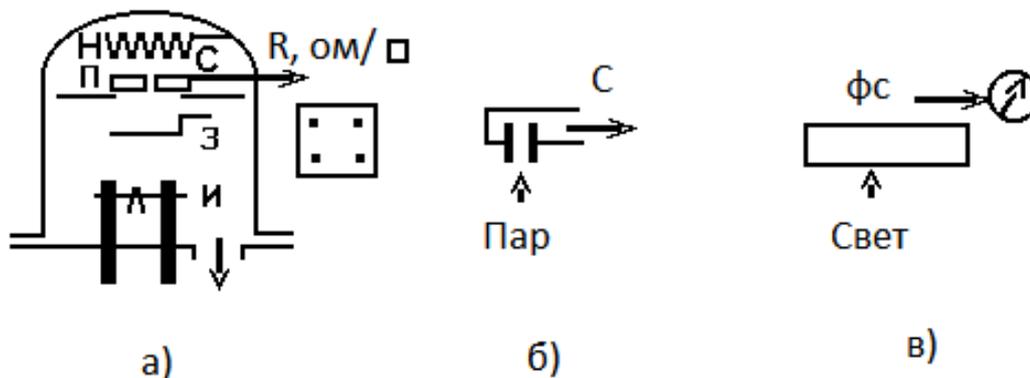


Рисунок 4.2 - Схемы реализации методов измерения толщины пленок

Резистивный метод измерения толщины пленок

Из закона Ома известна зависимость сопротивления R от длины l и площади поперечного сечения S :

$$R = \rho l / S,$$

где ρ - удельное сопротивление пленки.

Учитывая, что для пленки площадь поперечного сечения равна произведению толщины d на ширину “ B ” т.е.:

$$S = d \times B,$$

решая исходное уравнение относительно d , находим:

$$d = \rho \times l / R_n B,$$

где под Rn - понимается поверхностное сопротивление пленки (неявным образом указывающее на способ его получения). Единица измерения поверхностного сопротивления - $\bar{\Omega}/\Pi$ (ом на квадрат)

Диапазон измеряемых толщин резистивным методом составляет 1-5 мкм.

Для измерения электрического сопротивления в установке для нанесения пленки рядом с рабочей подложкой помещается специальная контрольная непроводящая подложка в виде квадратной пластины, на края которой заранее нанесены проводящие контакты. Эта контрольная пластина включается в одно из плеч мостовой схемы. По мере роста толщины пленки и снижения ее сопротивления происходит разбаланс мостовой схемы. Метод нашел широкое применение при напылении резисторов микросхем.

В числе недостатков метода следует отметить малую чувствительность вначале напыления, а также зависимость удельного сопротивления пленки от параметров технологического процесса (давления газа, скорости конденсации, температуры подложки). В ряде случаев пленка может быть повреждена электрическим пробоем вследствие пропуска высокого напряжения (~ 250 В) измерительными цепями при измерении высоких сопротивлений (\sim МОм). Метод непригоден для измерения толщины диэлектрических пленок.

Емкостной метод измерения толщины пленок

Этот метод контроля толщины пленок основан на измерении емкости между пластинами плоского конденсатора, помещенного на пути паров. Особенно хорошо зарекомендовал себя этот способ на пленках из диэлектрических материалов. При емкостном методе измерения толщины диэлектрических пленок также используется специальная контрольная подложка из диэлектрического материала, расположенная рядом с рабочей подложкой. На контрольной подложке изготовлен конденсатор такой конструкции, что, его емкость изменяется при нанесении на поверхность конденсатора тонкой диэлектрической пленки. Обкладки конденсатора представляют собой гребенчатые структуры, сформированные на узких полосках проводящего материала.

Система измерения снабжена опорным кварцевым генератором, а также имеет систему сравнения опорных и измеряемых частот. Метод реализован в приборе типа КСТ-1. Применим для измерения пленок SiO_2 ,

Cu, Cr, Mo, Re, W, сапфира, стекла. Погрешность прибора в диапазоне толщин 5-100 мкм не превышает 5% и не зависит от температуры. Прибор снабжен дифференцирующей цепью, что позволяет измерять скорость напыления.

К недостаткам метода следует отнести необходимость калибровки под каждый материал, а также необходимость чистки и травления электродов.

Оптический метод измерения толщины пленок

В основу оптического метода измерения толщины нанесенной пленки положена зависимость коэффициента пропускания света от толщины пленки. Световой поток I после прохождения света через пленку толщиной d определяется относительно первоначального потока I_0 соотношением Бугера-Ламберта:

$$I=I_0 \exp(-kd),$$

где k - коэффициент поглощения, зависящий от материала пленки.

При использовании этого соотношения необходимо учитывать, что полученная пленка может обладать значительным коэффициентом отражения, и отраженный поток следует вычесть из падающего потока. В табл. 4.1 приведены коэффициенты поглощения для некоторых пленок и материалов.

Таблица 4.1 - Коэффициенты поглощения излучения

Материал	алюминий	Медь	Серебро	Золото	Никель	стекло
К	1×10^6	5×10^5	8×10^5	6×10^5	$7,8 \times 10^5$	7×10^{-1}

Оптический метод позволяет измерять полупрозрачные пленки от 100 до 800 ангстрем.

В числе недостатков метода следует отметить неудобство использования в процессе напыления вследствие паразитной подсветки накаливаемым добела испарителем. Кроме того, источник подсветки часто запыхляется.

Ионизационный метод измерения толщины пленок

В основе метода лежит принцип сравнения сигналов с ионизационных датчиков давления с паром и без пара. На рис. 4.3 представлена схема реализации метода на базе двух ионизационных датчиков давления типа ПМИ-2.

На экране осциллографа отслеживается разность сигналов. В последних разработках подобных приборов (ИСТИ-1, ИСТИ2) предусмотрены пересчетные устройства для обработки разности сигналов. Погрешность метода ~10%.

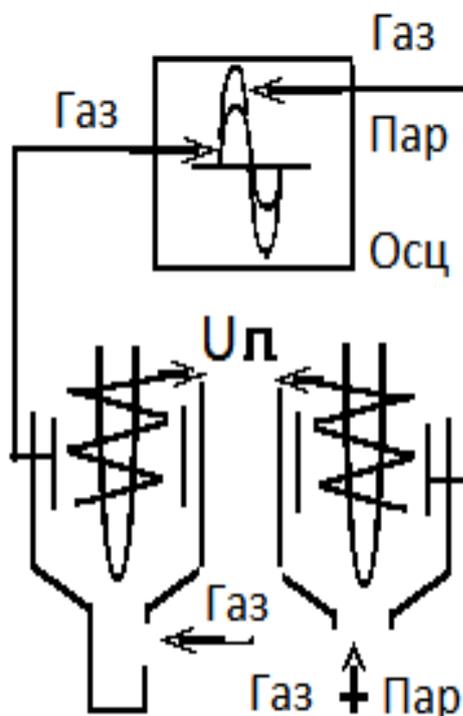


Рисунок 4.3 - Метод на базе двух ионизационных датчиков давления хода при эллипсометрическом измерении толщины пленки

Эллипсометрический метод измерения толщины пленок

Метод основан на эффекте разности коэффициентов отражения поляризованного света от пленки. На рис.4.4 представлена схема реализации метода.



Рисунок 4.4 - Эффект разности хода электромагнитной световой волны

Известно, что свет представляет собой электромагнитную волну. Луч света можно представить в виде небольшой окружности с осями E и H, аналогично осям X и Y. При освещении подложки под углом Брюстера (для стекла 57°) синусоида H-волны идет параллельно поверхности и отражается от нее. Синусоида E-волны идет перпендикулярно поверхности и врезается в нее на толщину пленки. Затем E-волна отражается от основания пленки и выходит из нее. В результате чего после отражения возникает разность хода E и H волн (излучение оказывается эллиптически поляризованным). Разность фаз между E и H волнами (Δ) пропорциональна яркости отраженного излучения и несет информацию о толщине пленки. Угол поворота осей эллипса (определяемый поворотом линз поляриметра при минимуме отраженного света) пропорционален показателю преломления пленки. Метод позволяет измерять толщину пленки в пределах 20-15000 ангстрем с точностью 2-3%. К недостаткам метода следует отнести приспособленность в основном к пленкам SiO_2 , сложность настройки и обслуживания эллипсометра.

4.9 Экспресс методы сравнительного анализа толщины пленок

Наряду с объективными способами измерения, существует ряд методов сравнительного анализа толщины пленок. Основные из них следующие:

1) микроскопический анализ. Анализ пленки производят под измерительными микроскопами типа МИИ-4, МИМ-7. Микроскоп МИИ-4 измеряет толщину по сдвигу интерференционных полос. Микроскоп типа МИМ-7 позволяет непосредственно увидеть и измерить толщину пленки. Для лучшей визуализации деталь с пленкой разрезается, срез полируется и травится в разбавленной азотной или соляной кислоте;

2) эталонный анализ. В ряде случаев толщину пленки сравнивают с эталоном. Широкое распространение получил визуальный контроль полупрозрачных пленок толщиной 200- 700 ангстрем. Свыше 700 ангстрем металлические пленки непрозрачны;

3) микровзвешивание. Технически этот способ реализуется напылением паров на развитую стрелку измерительного прибора;

4) метод стравливания. Этот метод основан на относительно постоянной скорости травления пленок в определенном травителе. Иногда в травитель добавляют уксусную кислоту для уменьшения скорости травления;

5) метод вихревых токов. При большой толщине пленки ее толщину можно оценить по ЭДС, наведенной вихревыми токами. Этот метод реализован в приборах типа ВН-30 Н и ВТ-40 НЦ;

6) метод электрического пробоя. Этот метод широко применяется для испытаний диэлектрических пленок;

7) метод пропускания излучения. Этот метод нашел применение при анализе пленок драгоценных металлов. В качестве зондирующего излучения применяется рентген, бета и гамма излучение, ультразвук.

4.10 Специальные методы нанесения пленок

Специальные методы нанесения пленок рассчитаны в основном на повышение адгезии. Наиболее универсальный способ напыления высокоадгезионной пленки состоит в ионизации паров и придании молекулам пара скоростей, превышающих тепловые. В основном это методы ионного нанесения покрытий, связанные с распылением материала ионами в различных условиях. Эти методы похожи на методы ионной очистки материалов. Принципиальное отличие состоит в том, что ионная очистка заканчивается после снятия поверхностных соединений и подходе к подложке, а ионное распыление материала только начинается.

Конденсация ионно-распыленных атомов

Суть методов ионно-плазменного напыления тонких пленок заключается в обработке поверхности мишени из нужного вещества ионами и выбивании атомов (молекул) из мишени. Энергия ионов при этом составляет величину порядка сотен и тысяч электрон-вольт. Образующийся атомный поток направляется на подложку, где происходит конденсация вещества и формируется пленка. Различают ионно-лучевое

распыление, осуществляемое бомбардировкой мишени пучком ускоренных ионов, сформированным в автономном ионном источнике, и собственно ионно-плазменное распыление, при котором мишень является одним из электродов в газоразрядной камере и ее бомбардировка осуществляется ионами, образующимися в результате газового разряда.

Для распыления мишени используются ионы инертных газов (обычно аргон высокой чистоты). Источником ионов служит либо самостоятельный тлеющий разряд, либо плазма несамостоятельного разряда (дугового или высокочастотного).

При формировании пленок методами ионного распыления мишеней в направлении подложки летят следующие компоненты:

- ионы остаточного газа (в основном углеводороды);
- ионы рабочего газа, бомбардирующего мишень (чаще аргона);
- нейтральные молекулы;
- соединения (карбиды, нитриды, оксиды и др.);
- ионы катода;
- пары металла катода.

Соотношение компонент зависит от способа и параметров напыления.

Таким образом, состав пленки, полученной ионными методами очень сложен. Поэтому ионные и плазменные методы формирования пленок чаще применяются не для промежуточных, а для финишных операций.

Метод ионного распыления является универсальным для получения тонких пленок различных материалов. Ионное распыление вещества происходит при бомбардировке его поверхности ионами инертного газа, распыленные частицы оседают на подложке, образуя пленку. Бомбардировке (облучению) ионами подвергается мишень, изготовленная из распыляемого вещества. Широкому применению метода в микроэлектронике способствовал ряд преимуществ его по сравнению с другими методами, а именно:

- а) возможность получения пленок тугоплавких металлов;
- б) отсутствие фракционирования при распылении и возможность получать пленки сплавов, смесей и соединений с сохранением стехиометрического состава;
- в) большая емкость источника и возможность напыления в установках непрерывного действия;
- г) равномерность пленки по толщине.

Распыление является практически безинерционным процессом и прекращается при отключении напряжения питания. Процесс нанесения пленок ионным методом легко контролируется и управляется, что способствует его автоматизации. Определенные недостатки метода – малая скорость напыления, повышенная загрязненность пленок – преодолеваются в специальных распылительных системах.

Плазменные методы ионного осаждения пленок

Плазменными называются методы, у которых для образования ионного потока на подложку используется газовый разряд при давлениях 10^{-2} - 10 Па независимо от способа образования частиц пара. На подложку может подаваться отрицательное напряжение смещения ($E_{см}$). Рабочими газами являются как инертные газы, так чистые реактивные газы (O_2 , N_2 , CH_4 и др.).

На рис. 4.5, а представлена схема ионно-плазменного нанесения пленок методом катодного распыления. На рис. 4.5, б представлена схема нанесения пленок с помощью автономных ионных источников.

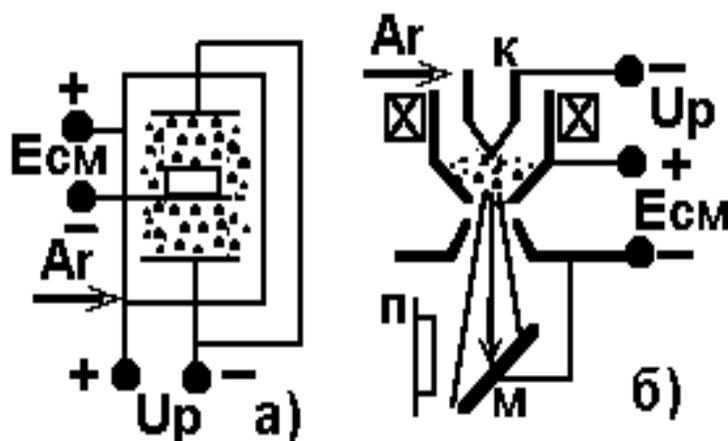


Рисунок 4.5 - Схемы нанесения пленок

Ионно-лучевые методы нанесения пленок

При ионно-лучевых методах осаждения пленок процесс конденсации осуществляется в высоком вакууме ($< 10^{-2}$ Па). Для образования ионов используется ионно-лучевой источник. При подаче рабочего газа (чаще аргона) происходит его термическая ионизация. В объеме источника

зажигается разряд напряжением U_p (1-2 кВ). Ионы газа извлекаются экстрактором и ускоряются в направлении мишени (М) и бомбардируют ее. Материал мишени направляется на подложку (П). Если подложка металлическая, то на нее можно подать отрицательное смещение потенциала ($E_{см}$) для повышения эффективности бомбардировки положительными ионами. Ионно-лучевые методы находят широкое применение для напыления износостойких и антикоррозионных покрытий.

Термоионное напыление

Процесс термоионного осаждения пленок представляет собой комбинацию термовакуумного и ионных методов. На рис. 4.6 представлены схемы реализации метода.

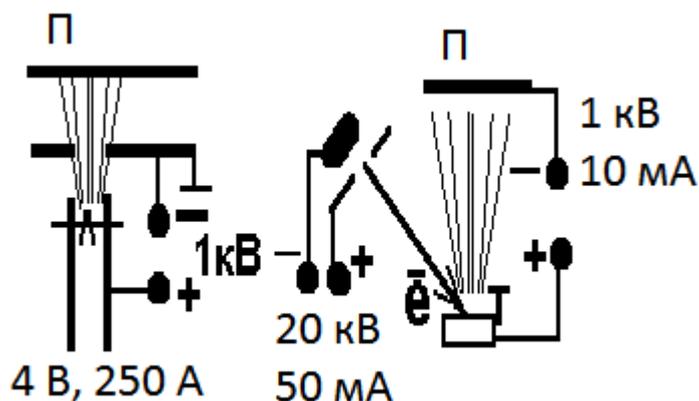


Рисунок 4.6 - Процесс термоионного осаждения пленок

Процесс проводится следующим образом. После откачки вакуумной камеры на высокий вакуум, прогрева подложки и обезгаживания испарителей, в камеру напускается рабочий газ до давления, обеспечивающего зажигание газового разряда в области подложка-испаряемый материал (1-10 Па). Подача отрицательного потенциала на подложку обеспечивает ее бомбардировку ионами и производит очистку от загрязнений и ионное травление поверхности катодным распылением. Далее без выключения разряда начинается прогрев и испарение напыляемого материала. Прилегающие к подложке начальные слои пленки состоят из смеси атомов подложки и осаждаемого материала, что увеличивает адгезию за счет поверхностной диффузии, стимулированной электрическим полем. В ряде случаев нагрев материала производят электронным лучом в тигле (Т). Расфокусированный электронный луч

может быть использован для обезгаживания внутренних элементов вакуумной камеры и подложки.

На скорость нанесения пленки влияет множество факторов. Наибольшее влияние оказывает масса бомбардирующего мишень газа, род газа, ток и напряжение разряда. Для ионных методов нанесения пленок часто применяется инертный газ аргон. Присутствие азота может вызывать нитрирование пленки, присутствие соединений углерода или кислорода – окисление или карбидирование. При увеличении напряжения увеличивается коэффициент распыления ($K=N_{\text{выб}}/N_{\text{пад}}$). Скорость напыления пропорциональна ионному току. Повышение давления уменьшает длину свободного пробега пара.

В ряде случаев термоионное нанесение пленок реализуется при электродуговом напылении пленок из материала электродов. При большой мощности дуги испарение материала электродов происходит с присутствием капельной фракции в пленке. Для уменьшения брызгового эффекта следует иметь в виду, что для каждого металла существует *предельная плотность мощности на электродах*, начиная с которой происходит брызгообразование. Например для титана предельная величина $g_{\text{Ti}} \sim 10^8 \text{ Вт/см}^2$, $g_{\text{Mo}} \sim 10^6 \text{ Вт/см}^2$. В ряде случаев под углом к парам устанавливают отражатели, однако, при этом уменьшается скорость напыления. В ряде случаев в поток пара вводят отрицательный электрод, что разбрасывает капли электростатическим потенциалом. Уменьшению капельной фракции способствует подача отрицательного потенциала на подложку.

Реактивное плазменное распыление материалов

При реактивном распылении в газоразрядную камеру наряду с рабочим газом (обычно аргоном) добавляется небольшое количество реакционного активного газа (кислорода, азота и др.), в результате чего на подложке образуется пленка из химического соединения, образованного атомами мишени и активного газа. Если, например, мишень изготовлена из алюминия, а в качестве активного газа используется кислород, то на подложке получается пленка из оксида алюминия, если же в камеру добавляется азот, то получится пленка из нитрида алюминия.

Кроме оксидных и нитридных пленок, данным способом можно получать карбидные и сульфидные пленки, добавляя в камеру соответственно метан CH_4 или пары серы. Для получения химического

соединения необходимо строго определенное парциальное давление активного газа, зависящее от материала мишени. Поэтому чаще получаются не химические соединения, а твердые растворы. На основе одной мишени из какого-либо металла и различных активных газов можно получать широкую гамму свойств осаждаемых пленок – от проводящих и низкоомных резистивных до высокоомных резистивных и диэлектрических.

Использовать реактивное распыление взамен непосредственного распыления мишени из химического соединения целесообразно тогда, когда коэффициент распыления данного химического соединения (оксида, нитрида и так далее) низкий, либо тогда, когда технологически трудно изготовить массивную мишень из этого соединения. Кроме того, реактивное распыление создает условия для гибкого управления свойствами пленок при создании многослойных структур (например, пленочных конденсаторов).

В общем случае процесс осаждения пленок при реактивном распылении обусловлен тремя механизмами, действующими параллельно:

- образование химического соединения на поверхности мишени и его распыление;
- образование химического соединения в пролетном пространстве "мишень - подложка" и осаждение его на подложку;
- взаимодействие осажденных на подложке атомов мишени с атомами активного газа.

В условиях невысокого давления газа в камере вероятность второго механизма весьма мала и его вклад в общий процесс формирования пленки на подложке незначителен. Что касается соотношения вкладов первого и второго механизмов, то это зависит от условий распыления, а именно, от рода материала мишени и от рода активного газа, от общего давления газовой смеси в камере и от парциального давления активного газа; от расстояния между мишенью и подложкой. На практике часто уменьшение давления парциального газа при прочих равных условиях увеличивает вероятность образования соединения непосредственно на подложке. В большинстве случаев необходимые реакции полностью протекают при содержании активного газа в газовой смеси (аргон + активный газ) порядка единиц процентов.

Магнетронное распыление материалов

В последнее время успешно развивается напыление пленок из плазмы магнетронного разряда. В этом случае отрицательный потенциал подается на подложку, помещенную в магнитное поле. Отличительной особенностью магнетронного распылителя является наличие двух скрещенных полей – электрического и магнитного.

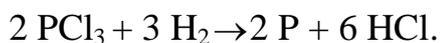
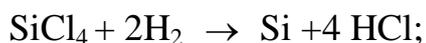
Если из мишени-катода будет испускаться электрон (за счет вторичной электронной эмиссии), то траектория его движения будет определяться действием на него этих полей. Под воздействием электрического поля электрон начнет двигаться к аноду. Действие магнитного поля на движущийся заряд приведет к возникновению силы Лоренца, направленной перпендикулярно скорости. Суммарное действие этих сил приведет к тому, что в результате электрон будет двигаться параллельно поверхности мишени по сложной замкнутой траектории, близкой к циклоиде.

Важным здесь является то, что траектория движения замкнутая. Электрон будет двигаться по ней до тех пор, пока не произойдет несколько столкновений его с атомами рабочего газа, в результате которых произойдет их ионизация, а сам электрон, потеряв скорость, переместится за счет диффузии к аноду. Таким образом, замкнутый характер траектории движения электрона резко увеличивает вероятность его столкновения с атомами рабочего газа. Это означает, что газоразрядная плазма может образовываться при значительно более низких давлениях, чем в методе катодного распыления. Значит и пленки, полученные методом магнетронного распыления, будут более чистыми. Другое важное преимущество магнетронных систем обусловлено тем, что ионизация газа происходит непосредственно вблизи поверхности мишени. Газоразрядная плазма локализована вблизи мишени, а не "размазана" в межэлектродном пространстве, как в методе катодного распыления. В результате резко возрастает интенсивность бомбардировки мишени ионами рабочего газа, тем самым увеличивается скорость распыления мишени и, как следствие, скорость роста пленки на подложке (скорость достигает несколько десятков нм/с). Наличие магнитного поля не дает электронам, обладающим высокой скоростью, долететь до подложки, не столкнувшись с атомами рабочего газа. Поэтому подложка не нагревается вследствие бомбардировки ее вторичными электронами. Основным источником нагрева подложки является энергия, выделяемая при торможении и

конденсации осаждаемых атомов вещества мишени, в результате чего температура подложки не превышает 100 - 200 °С. Это дает возможность напылять пленки на подложки из материалов с малой термостойкостью (пластики, полимеры, оргстекло и так далее).

4.11 Эпитаксия

Эпитаксия - это процесс получения высококачественной монокристаллической пленки чистого состава. В таких пленках испытывают нужду новейшие электронные приборы полупроводниковой и лазерной техники, оптоэлектроники, вычислительной техники и многие другие. Такие пленки толщиной 2-25 мкм обладают металлической проводимостью (менее 100 ом на квадрат). С помощью прямого процесса напыления такие пленки получать затруднительно вследствие невозможности исключить неконтролируемые примеси в напыляемой пленке. Традиционно для получения и легирования эпитаксиальных пленок кремния используют набор поверхностных гетерогенных реакций при давлении близком к атмосферному и температурах около 1000⁰ С:



На рис. 4.7 представлена схема проведения традиционного процесса эпитаксии.

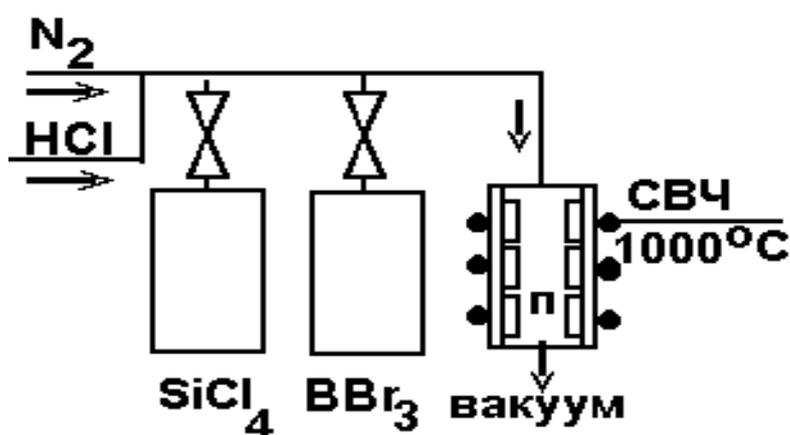


Рисунок 4.7 - Схема проведения традиционного процесса эпитаксии

Недостатки традиционной эпитаксии заключаются в следующем:

- жесткая взаимосвязь потока реагентов с температурой гетерогенной реакции;

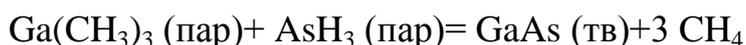
- существует степень сегрегации поверхности (часть пленки всегда формируется поликристаллической);

- вследствие большой температуры имеют место диффузионные процессы из сформированной пленки в подложку.

Методы решения проблемы заключаются в более высококачественном напылении пленок с последующей ориентацией слоев в виде кристаллической решетки. Такой процесс называется *искусственной эпитаксией*.

4.12 МОС - гидридная эпитаксия

В основе газофазной реакции из металлоорганических соединений (МОС) лежат реакции пиролиза легколетучих соединений. С помощью МОС - гидридной эпитаксии выращивается большинство полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$. Наиболее известно получение таким способом современного материала арсенида галлия – GaAs. Некоторые металлоорганические соединения: $Ga(CH_3)_3$ – триметилгаллий (ТМГ), $Al(CH_3)_3$ – триметилалюминий (ТМА), $In(C_2H_5)_3$ – триметилиндий (ТМИ). Некоторые гидриды: AsH_3 – арсин, PH_3 – фосфин. Суммарной реакцией образования соединений типа $A^{III}B^V$ является реакция типа:



На рис 4.8 представлена схема установки для МОС – гидридной эпитаксии.

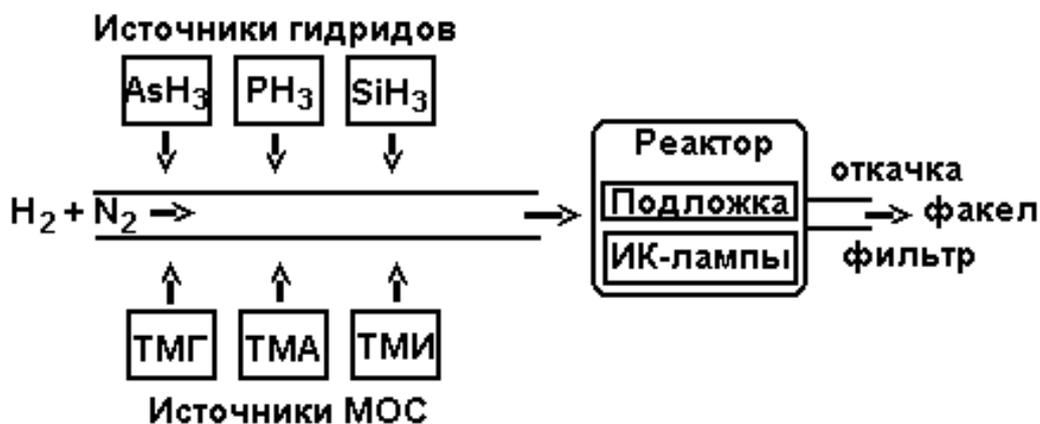


Рисунок 4.8 - Схема процесса МОС-гидридной эпитаксии

В качестве газа-носителя используется водород или его смесь с азотом. Благодаря реакциям в паровой фазе и пиролизу металлоорганических соединений, на подложках выделяется металлический алюминий, галлий или индий. Для легирования примесями акцепторного типа чаще применяют диэтилцинк $Zn(C_2H_5)_2$, донорного – H_2S , H_2Se или SiH_4 . Для получения соединений АІІВV в качестве источника элемента ІІІ группы используют металлоорганические соединения (например, триметилгаллий (ТМГ) для синтеза GaAs и триметилиндий (ТМИ) для InP или InGaP). В качестве источников элементов V группы служат газы арсин и фосфин.

Этот метод не требует дорогостоящего оборудования, обладает высокой производительностью. Достоинствами МОС-гидридной эпитаксии являются также необратимость химических реакций, лежащих в его основе, и отсутствие в парогазовой смеси химически активных с растущим слоем компонент. Это позволяет проводить процесс эпитаксии при сравнительно низких температурах роста и осуществлять прецизионную подачу исходных веществ, что позволяет обеспечить контролируемое легирование слоев и получение структур в широком диапазоне составов твердых растворов с резкими концентрационными переходами.

К недостаткам МОС-гидридного метода можно отнести высокую токсичность используемых исходных соединений, в первую очередь арсина, а также сложность химических процессов, приводящих к образованию слоя GaAs, что затрудняет моделирование условий образования эпитаксиальных слоев с нужными свойствами.

Особенность метода состоит в том, что в эпитаксиальном реакторе создается высокотемпературная зона, в которую поступает газовая смесь, содержащая разлагаемое соединение. В этой зоне протекает реакция и происходит выделение и осаждение вещества на подложке, а газообразные продукты реакции уносятся потоком газа-носителя.

4.13 Молекулярно-лучевая эпитаксия

Молекулярно-лучевая эпитаксия заключается в осаждении испаренных элементарных компонентов на подогретую монокристаллическую подложку. Таким образом получают основные

структуры на основе арсенида галлия (GaAs) непосредственно управляя ростом кристалла арсенида галлия.

Основными преимуществами метода являются: низкая температура процесса и высокая точность управления уровнем легирования. Снижение температуры процесса уменьшает диффузию примеси из подложки и автолегирование. Это позволяет получать качественные тонкие слои. Легирование при использовании данного метода является безинерционным (в отличие эпитаксии из газовой фазы), что позволяет получать сложные профили легирования. Температура нагревателей подбирается таким образом, чтобы давление паров испаряемых материалов было достаточным для формирования соответствующих молекулярных пучков. Испаряемое вещество с относительно высокой скоростью переносится на подложку в условиях вакуума. Нагреватели располагаются так, чтобы максимумы распределений интенсивности пучков пересекались на подложке.

Подбором температуры нагревателей и подложки получают пленки со сложным химическим составом. Дополнительное управление процессом наращивания осуществляется с помощью заслонок, расположенных между нагревателем и подложкой. Использование этих заслонок позволяет резко прерывать или возобновлять попадание любого из молекулярных пучков на подложку.

Кинетика процесса молекулярно-лучевой эпитаксии

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) – это технологический процесс формирования наноматериалов в виде пленок требуемого состава из направленного потока молекул в условиях сверхвысокого вакуума.

На начальной стадии формирования пленки атомы из молекулярного потока адсорбируются на поверхности подложки. Адсорбция характеризуется понижением свободной энергии ΔG и убылью энтропии ΔS . Из уравнения:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

следует, что энтальпия ΔH должна быть отрицательной, т.е. адсорбция – процесс экзотермический, всегда сопровождающийся выделением энергии.

На следующей стадии происходит проникновение атомов нарастающей фазы в объем материала подложки за счет диффузии, растворения, движения по стенкам капилляров и границам зерен. Адсорбирующиеся атомы могут образовывать химические связи с атомами с выделением энергии от 80 до 100 кДж/моль. Такой процесс называется хемосорбцией.

При приближении атома к поверхности на него начинают действовать дальнедействующие силы притяжения.

На рис. 4.9 представлены зависимости потенциальной энергии при адсорбции частиц. В зависимости от электронного состояния системы энергия взаимодействия будет описываться кривыми 1 или 2. Кривая 1 соответствует «антисвязывающим» состояниям, а кривая 2 – «связывающим». На больших расстояниях проявляются дальнедействующие силы притяжения Ван-дер-Ваальса. Суммарная энергия взаимодействия изменяется согласно кривой 3, которая описывает химическую адсорбцию.

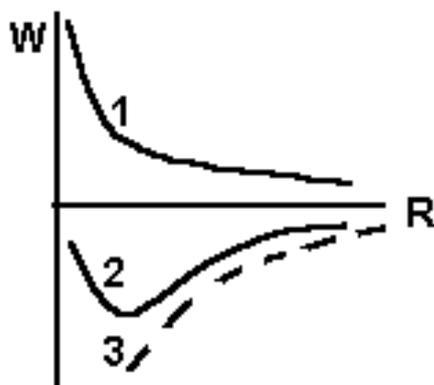


Рисунок 4.9 - Зависимость потенциальной энергии частиц от расстояния

В результате хемосорбции возникает любая из трех основных химических связей: ионная, ковалентная или координационная.

На рис. 4.10 представлена модель роста структур в процессе МЛЭ.

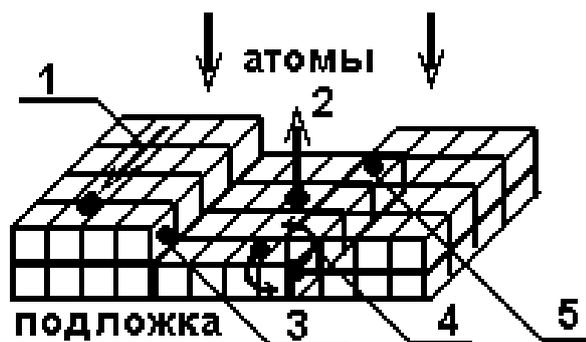


Рисунок 4.10 – Схема процессов при выращивании структур методом МЛЭ. 1 – поверхностная диффузия; 2 – десорбция; 3 – встраивание в решетку; 4 – обмен атомов; 5 – поверхностная агрегация (зародышеобразование)

Каждый участок поверхности представляет собой небольшой участок поверхности кристалла и характеризуется индивидуальной химической активностью. Число частиц, поступающих за единицу времени на единицу площади подложки определяется соотношением:

$$n = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (4.1)$$

где P – давление паров; m – молекулярный вес частиц; k – постоянная Больцмана и T – температура поверхности.

Отражение пара от подложки (десорбция) происходит не сразу. Продолжительность жизни молекулы или атома на поверхности τ отличается от среднего времени ($\tau_0 \sim 10^{-12}$ сек) и зависит от температуры:

$$\tau = \tau_0 \exp(E_d / kT), \quad (4.2)$$

где E_d – энергия активации процесса десорбции, T – температура подложки.

Различают три основных типа роста тонких эпитаксиальных пленок в зависимости от коэффициента покрытия подложки θ . На рис. 4.11 представлены основные модели эпитаксиального роста: послойный (а), островковый (б), рост слоя с островками (в).

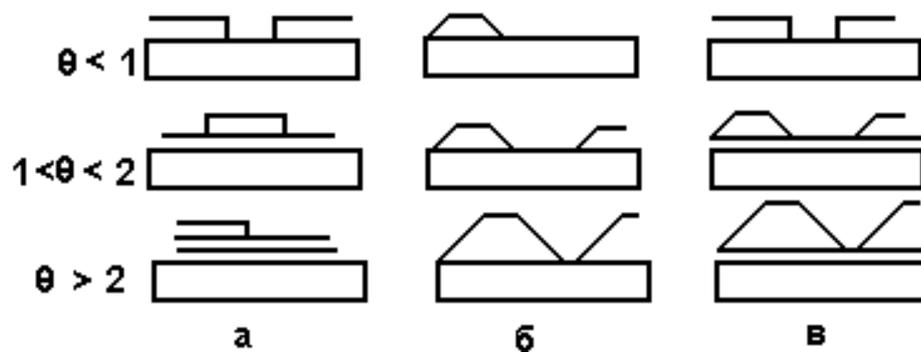


Рисунок 4.11 – Основные модели роста кристалла при эпитаксии; послойный (а), островковый (б), рост слоя с островками (в).

Послойный рост (layer-by-layer growth). Механизм Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merve, FM). При этом механизме роста каждый последующий слой пленки начинает формироваться только после полного завершения роста предыдущего слоя. Послойный рост имеет место, когда взаимодействие между подложкой и слоем атомов значительно больше, чем между ближайшими атомами в слое.

Островковый рост или рост Вольмера-Вебера (island growth, Vollmer-Weber, VW). При островковом механизме роста вещество с самого начала оседает на поверхности в виде многослойных конгломератов атомов.

Рост слоя с островками – это промежуточный механизм между первыми двумя механизмами. Это рост Странски-Крастанова (Stransky-Krastanov, SK, layer-plus-islandgrows), при котором первый слой полностью покрывает поверхность подложки, а на нем происходит рост трехмерных островков пленки.

Условие, реализации того или иного механизма роста, можно получить из соотношений коэффициентов поверхностного натяжения подложка – вакуум δS , пленка – вакуумом δF , подложка – пленка $\delta S/F$. (рис. 4.12). Коэффициент поверхностного натяжения поверхности равен свободной энергии единицы поверхности. Согласно этому определению сила dF , действует на бесконечно малый элемент dl границы раздела двух сред трехмерного островка пленки.

$$dF = \delta dl \quad (4.3)$$

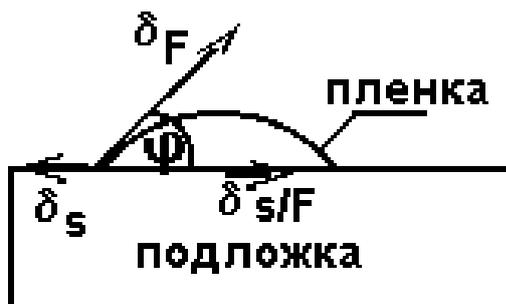


Рисунок 4.12 – Схема, поясняющая механизм формирования пленки

Условие равновесия для островка пленки на подложке выразится:

$$\delta_s = \delta_{s/F} + \delta_s \cos \varphi, \quad (4.4)$$

где φ - краевой угол, т.е. угол, образованный касательной к поверхности островка пленки и поверхностью подложки.

Если краевой угол равен нулю, то островок «растекается» тонким слоем по поверхности подложки, что соответствует послойному механизму роста. Это условие приводит к следующему соотношению между коэффициентами поверхностного натяжения:

$$\delta_s \geq \delta_s + \delta_{s/F}. \quad (4.5)$$

Таким образом, при $\varphi=0$ – реализуется послойный рост, при $\varphi>0$ реализуется механизм роста островков.

Скорость хемосорбции V определяется энергией активации E_a и коэффициентом заполнения $f(\theta)$ поверхности ранее сорбированными атомами:

$$V = \frac{\alpha \cdot P}{\sqrt{2\pi m k T}} \cdot f(\theta) \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (4.6),$$

где α – коэффициент прилипания; P – давление; m – молекулярная масса сорбируемой частицы; T – температура поверхности; k – постоянная Больцмана.

Фазовая диаграмма процесса роста эпитаксиальных пленок

При определенной для выбранного вещества критической температуре один механизм конденсации сменяется другим. На рис. 4.13 представлен фрагмент фазовой диаграммы для висмута, на которой имеется область жидкой фазы «Ж», область пара – «П», область твердой фазы кристалла – «К», а также область тройной точки «А».

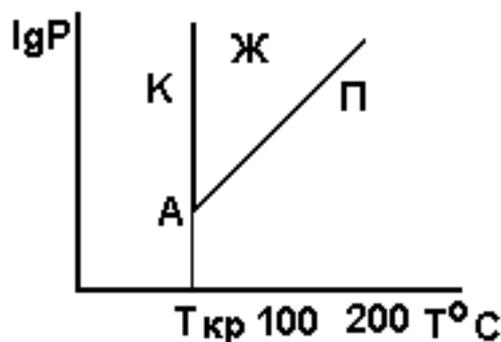


Рисунок 4.13 – Фазовая диаграмма равновесных состояний висмута

В зависимости от давления пара и температуры, в молекулярном пучке реализуется механизм ПК (пар-кристалл) или ПЖ (пар-жидкость). Механизм ПЖ реализуется при давлениях выше тройной точки. На монокристаллических подложках сильнее проявляется ПК – механизм роста. Жидкая фаза неустойчива и кристаллизуется (переход ЖК). Но в конденсате остаются различные дефекты кристаллической структуры.

Для начала образования пленки необходимо преобладание сорбции над десорбцией и фазовое превращение. Новая фаза образуется лишь в системах с пересыщением. Относительное пересыщение характеризуется отношением давлений. Изменение химических потенциалов двух фаз в таком случае можно выразить через коэффициент пересыщения как:

$$\Delta\mu = kT \ln(P_1 / P_2) . \quad (4.7)$$

Для установления связи между радиусом сферического зародыша и давлением пара используют соотношение Гиббса — Томсона:

$$RT \ln \frac{P_r}{P_\infty} = \frac{2\delta V_m}{r_{кр}}, \quad (4.8)$$

где P_r — давление пара над зародышем в виде сферы с радиусом r ; P_∞ — равновесное давление пара над плоской поверхностью жидкости; V_m — молярный объем; $r_{кр}$ — радиус критического зародыша; δ — удельная поверхностная энергия. Как следует из анализа этого соотношения, для достижения малых значений $r_{кр}$ следует использовать большие пресыщения. Оценки по вышеприведенной формуле дают значения $r_{кр} \sim 1-10$ нм.

Теория формирования эпитаксиальной пленки по Френкелю. Согласно теории Френкеля поверхность можно представить в виде потенциального рельефа с чередующимися буграми и впадинами. Часть атомов может десорбироваться или мигрировать по впадинам, образуя комплексы из двух, трех атомов и более. Такой механизм роста называется «пар – кристалл» (ПК). Критическая интенсивность подачи атомов, необходимая для начала формирования пленки, зависит от температуры ее поверхности:

$$I_{кр} = \frac{1}{4\delta_o\tau_o} \exp\left(\frac{E_o + \Delta E_1}{kT_{кр}}\right), \quad (4.9)$$

где δ_o — эффективная площадь, занятая изолированным адсорбированным слоем;

E_o — энергия десорбции атома;

ΔE_1 — энергия связи атома с соседним адсорбированным атомом.

Теория формирования пленки по Н.Н. Семенову. По теории Семенова мигрирующие по поверхности атомы рассматриваются как двумерный газ, переходящий в двумерную жидкость. Жидкость затем кристаллизуется. По мере кристаллизации происходит наращивание моноатомных слоев. Такой механизм получил название «пар – жидкость» (ПЖ)

Критическое давление конденсации выражается зависимостью:

$$P_{кр} = D \exp\left(-\frac{E_{\partial} + \Delta g}{kT_{кр}}\right), \quad (4.10)$$

где E_{∂} - теплота десорбции; Δg – теплота испарения двумерной жидкости; $T_{кр}$ – критическая температура подложки, D – коэффициент конденсации

Часто в литературе рассматривают еще один механизм роста – статистическое осаждение. При этом механизме роста пленки атомы осаждаемого вещества располагаются на поверхности согласно распределению Пуассона так, как если бы их бросали случайно и они просто прилипали бы на месте падения.

Маркировка эпитаксиальных структур

Маркировка позволяет определить основные параметры эпитаксиальных структур. Маркировку проводят в виде дроби с числителем, характеризующим эпитаксиальный слой и знаменателем, характеризующим подложку.

На рис. 4.14 представлен вариант расшифровки эпитаксиальной структуры.

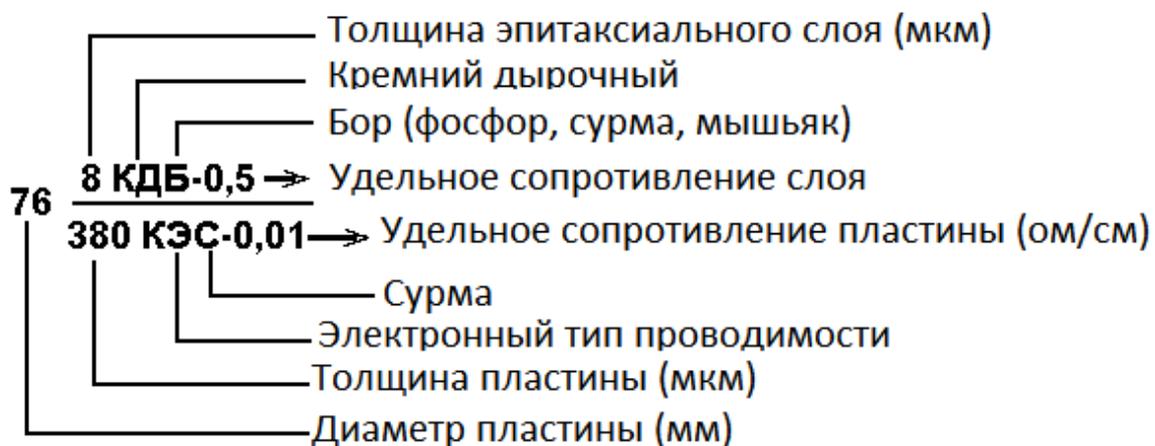


Рисунок 4.14 - Вариант расшифровки эпитаксиальной структуры

При многослойных структурах обозначение принимает вид этажерки. Каждый этаж обозначает следующие параметры:

- первая цифра-толщина контактного n^+ слоя в мкм;
- следующие буквы обозначают название материала (например, АГЭ-арсенид галлия эпитаксиальный, АГЧТ-3 арсенид галлия третьей группы);

- затем указывается концентрация носителей заряда (например, 1-18 обозначает концентрацию $1 \times 10^{18} \text{ 1/см}^3$);

- последняя цифра (А, Б, В, Г, Д и т.д.) указывает группу допуска параметров из технологической таблицы.

Вместе с тем следует заметить, что иногда в маркировку вводят не название материала, а его марку, вводятся буквы, характеризующие легирующие элементы.

5 Сертификация технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов в вакуумных технологиях

5.1 Общие понятия

Под сертификацией понимается стандартно-выпускаемое заводом оборудование, имеющее технический паспорт. Следует отличать устройство от установки. К устройству подводится однофазная сеть и оно имеет установленную мощность до 1000 Вт. К установке подводится трехфазная сеть. Установка имеет установленную мощность свыше 1 кВт. Установка может иметь подводку воды, воздуха, технических газов. Различают оборудование первого габарита (до 3-х кВт), второго габарита (до 10 кВт) и третьего габарита (свыше 10 кВт). Различают оборудование до 1000 В и высоковольтное – свыше 1000 В.

По своему построению типовые электрофизические установки подразделяются на напылительные, распылительные, упрочняющие, электронно-лучевые, ионно-лучевые, ионно-плазменные, смешанные.

По типу генерации паров материалов установки делятся на установки с генерацией паров путем термического, (в том числе электронно-лучевого нагрева). Распылительные установки предназначены для распыления материалов путем ионного или высокочастотного распыления, а также для формирования пленок в разряде или плазме.

Некоторые марки установок расшифровываются следующим образом: УВН – установка вакуумного напыления; ВУП – вакуумный универсальный пост; ЭЛУ – электронно-лучевая установка; МИР – установка для формирования пленок в магнетронном разряде; УРМ – установка реактивно-магнетронного распыления в плазме или в дуге (УРМ 387.2 – БУЛАТ). Обычно после марки установки стоят цифры, отражающие модификацию разработки.

В последнее время успешно развиваются установки смешанного типа (например, марки КАТОД), которых в одной установке реализованы системы нескольких способов формирования покрытий.

Отдельную группу составляют высоковольтные лучевые установки для размерной обработки материалов (типа ЭЛУРО), для легирования полупроводниковых материалов ионными потоками (типа ВЕЗУВИЙ), для упрочнения металлов (типа ННВ).

Современные технологические установки могут быть снабжены системой автозапуска, аварийной остановки, компьютером, электронным бортовым журналом.

6 Разработка инструкций по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала

Прежде чем попасть в руки к потребителю, оборудование должно пройти сертификацию, которая возможна только при наличии технического паспорта. После этого аппаратура допускается к продаже. Без наличия технической документации также нельзя использовать устройство.

Технический паспорт предназначен для подтверждения безопасности устройств. Он служит для информирования владельца оборудования о его свойствах и правильной эксплуатации.

Наличие обязательных пунктов в техническом паспорте регулируется документом под названием ГОСТ 2.610-2016. Согласно его нормативам, информация технического паспорта должна состоять из таких разделов: Оборудование Оборудование Данные об изделии и технических характеристиках. Предназначены для работников, обслуживающих оборудование. Описывают эксплуатационные свойства устройства и подтверждают его надежность. Перечень комплектующих, прилагаемых к оборудованию. Этот пункт может отсутствовать, если изделие цельное и не предусматривает наличия дополнительных деталей для монтажа и запчастей. Указание на сроки эксплуатации, хранения и исчерпания ресурсов. Список гарантийных прав производителя. Представляет собой перечень прав и обязанностей изготовителя, подкрепленных законодательной базой. Раздел рассказывает о способах хранения и датах окончания эксплуатации. Данные о консервации. Описываются меры по сохранению оборудования. Свидетельство упаковывания. Его оформляет производитель, а подписывают работники-упаковщики. Свидетельство приемки оборудования. Содержит данные об испытаниях устройства и основаниях для его приемки. Подписывается теми, кто несет ответственность за соответствие оборудования техническим документам. Информация о транспортировке и передаче иным лицам. Описывается момент сдачи оборудования в пользование, в том числе и его технические характеристики в это время. Содержит данные об ответственных лицах, являющихся владельцами устройства. Рассказывает о правилах и ограничениях во время мобилизации оборудования. Сроки ремонта оборудования в целом или отдельных его частей. При этом отсчет времени

на эксплуатацию начинается с момента испытания устройства и измеряется в единицах, применимых к конкретному ресурсу. Дополнительные условия по эксплуатации и хранению. Их наличие необязательно. Подразумевают собой описание специальных условий по эксплуатации оборудования и мерам безопасности во время его использования. Меры по утилизации. Описываются этапы подготовки и отправки на утилизацию. Составляется список комплектующих, подлежащих утилизации. Стоимость изделия и условия его приобретения. Описывается подготовка оборудования к продаже, этапы возврата и обмена товара и прочие данные, которые могут понадобиться при заключении сделки купли-продажи.

6.1 Инструкция по эксплуатации оборудования

Профилактика

Профилактика новых форвакуумных насосов

Перед подключением вакуумного насоса следует установить правильное направление вращения его ротора (указывается на корпусе насоса). Для этого необходимо снять крышку с электродвигателя и включить насос на 1 секунду. Если направление вращения в противоположную сторону, то меняют местами подключение любые из двух фаз.

Рекомендуется после нескольких часов работы нового насоса сменить в нем масло. В насос можно заливать только рекомендованное заводом масло, что связано со смазывающими свойствами, вязкостью и кислотностью масла. Эксплуатация насоса при входном давлении более 40 мм рт ст запрещена.

Профилактика механических вакуумных насосов

Механический вакуумный насос является изделием точной механики и требует определенных навыков его проведения. Целесообразно проанализировать условия работы насоса, проверить уровень масла в насосе, слить из насоса старое масло, промыть насос свежим, осушенным маслом.

Часто пластинчато-роторные вакуумные насосы имеют заводской дефект – течь в газобалластное устройство, или в клапан, выравнивающий

давление при остановке насоса. Иногда возникает заклинивание насоса или «медленное раскручивание ротора». Это связано с попаданием инородного тела в насос (ваты, резины, стекла от датчиков) или с разбуханием от влаги пластин ротора, выполненного из текстолита. В этом случае насос следует разобрать, шлифовать пластины, удалить ржавчину, прочистить отверстия выхлопных клапанов. При разборке следует четко запоминать ориентацию всех деталей и отверстий в них.

Профилактика диффузионных вакуумных насосов

Если диффузионный насос не обеспечивает паспортный вакуум, то его разбирают, проводят чистку элементов от нагара. Часто недостаточный вакуум связан с недостаточным охлаждением насоса. Для работы высоковакуумного диффузионного насоса лучше использовать так называемую «деионизованную воду», которая не образует отложения солей на элементах системы охлаждения. Вода на выходе работающего насоса должна быть холодной с расходом ~ 10 мл/с. Для очистки системы охлаждения диффузионного насоса используется смесь перекиси водорода и нашатырного спирта 1:1. Смесь создает избыточное давление, удаляющее хлопья коррозии или посторонние включения. Работу необходимо проводить в резиновых перчатках.

Часто потеря скорости откачки по потоку происходит из-за ошибочного подключения вакуумного трубопровода не к выходу диффузионного насоса, а к служебному патрубку, служащему для свинчивания элементов насоса. В этом случае не используется последняя эжекторная ступень диффузионного насоса, обеспечивающая выходное давление 10 Па и более. Полезно проверить щупом зазоры сопел насоса. Часто сопла бывают погнутыми, а зазоры нарушенными.

Для перестройки диффузионного насоса под более глубокий вакуум (не ниже 10^{-6} мм рт ст) необходимо применить вакуумное масло с более низким давлением паров (например ВМ-5, ВМ-7). Кроме того, необходимо провести полировку внутри стального корпуса насоса, а также уменьшить зазор в самом верхнем сопле насоса путем снятия регулировочного кольца.

6.2 Инструкции по сервисному обслуживанию различных типов вакуумных установок

Вакуумные установки состоят из нескольких отдельных схем. Это: вакуумная схема, схема охлаждения, схема пневматического или гидравлического питания для открывания камер, шлюзов, затворов, приводов, силовая электрическая часть, высоковольтная электрическая часть, источник частиц со схемой питания, пуль управления.

Сервисное обслуживание вакуумных камер

КПД формирования пленок невысок и составляет единицы процента. Все остальное «садится» на элементы вакуумной камеры и формирует покрытие с большим содержанием газов. При разгерметизации вакуумная камера работает как пылесос.

Чистка вакуумных камер и отдельных элементов установок от ранее распыленных материалов должна проводиться только по специальной технологии, разрешенной отделом техники безопасности. Не допускается чистка камер механическими средствами или наждачными шкурками без использования вытяжных пылесосов и противогазов с протяженными воздуховодами. В некоторых случаях очистка мелких деталей может проводиться путем прокаливания.

Инструкции по сервисному обслуживанию безмасляных вакуумных установок

Форвакуумный тракт безмасляной откачки должен иметь прогреваемую электрическим током ловушку масел, а также ловушку, охлаждаемую жидким азотом. При давлении ~ 2 Па необходимо залить жидкий азот в форвакуумную ловушку. (Более раннее заливание азота может привести к сильному росту инея, уменьшению проводимости вакуумных коммуникаций и выделению воды). Понижение давления до 0,1- 0,01 Па (10^{-3} - 10^{-4} мм рт ст) проводится криогенными или криосорбционными насосами. Понижение давления от 0,01 Па проводится электроразрядными или турбомолекулярными насосами. Запуск электроразрядных насосов на давлении более 10^{-2} Па нежелателен из-за

«науглероживания» вследствие прогрева элементов и газовыделения углеводородов.

Особенностью турбомолекулярных насосов является необходимость обеспечения давления 1 Па ($\sim 10^{-2}$ мм рт ст) на выходе насоса. К сожалению, незначительное число механических вакуумных насосов даже прогрессивной серии обеспечивает это давление при рабочем потоке газа. На входе электроразрядных и турбомолекулярных насосов необходимо иметь сетки, предупреждающие попадание посторонних предметов.

Инструкции по поиску негерметичности вакуумных систем

Наибольшей трудностью при сервисе вакуумных систем является нахождение мест нарушения герметичности (мест течей). Обычно течи происходят в местах проведения работ. Это источники частиц, токовводы, вводы охлаждения.

Во фланцевых соединениях в основном изнашиваются прокладки. Необходимо избегать изготовления прокладки путем склейки резинового шнура. В последнее время в качестве уплотнений применяется паста «герметик» – силиконовая резина. После заполнения канавки пасте дают высохнуть 1-2 дня.

Иногда в качестве прокладок применяют медь, алюминий, свинец. Такие прокладки являются одноразовыми. Наиболее часто течи через металлические уплотнения возникают в местах перекоса при монтаже системы. Наиболее эффективным способом поиска течи является метод пробной жидкости. В качестве инструмента используется медицинский шприц, заполненный ацетоном. При поиске течей в диапазоне 1-0,1 мм рт ст, где: мало измерительного оборудования применяют метод поэлементного поиска течи от затвора до затвора, а также затяжку всех уплотнений вакуумной системы.

Инструкции по эксплуатации типовых вакуумных установок с масляными средствами откачки

Алгоритм включения установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- 1) составить вакуумную схему установки;
- 2) закрыть все вентили;
- 3) перевести все тумблеры влево/вниз;
- 4) провести внешний осмотр установки на наличие нагревателя на диффузионном насосе, наличие воды для охлаждения, отсутствие посторонних предметов, проводов и т.п.;
- 5) провести импульсное включение механического насоса. (При отсутствии системы автозапуска включение провести «рывками»). Такой запуск необходим для удаления остатков масла из плунжерных камер, а также для предотвращения гидравлического удара и сохранения муфты между электродвигателем и вакуумным насосом.
- 6) открыть обводную (байпасную) систему для откачки рабочей камеры;
- 7) по достижении вакуума $\sim 0,1$ мм рт. ст. включить нагреватель диффузионного насоса и ждать ~ 45 минут до выхода установки на высокий вакуум.

На заключительном этапе проводится выключение установки. Особенность выключения состоит в том, что диффузионный насос должен остыть во избежание выгорания масла. Время остывания составляет 45-50 минут. Все это время форвакуумный насос должен откачивать выход диффузионного насоса. Для сокращения времени проведения процесса между камерой и диффузионным насосом закрывают затвор и в камеру напускают воздух, достают детали, проводят их анализ. Таким образом, в процессе схода диффузионного насоса с режима параллельно проводятся операции по анализу покрытия. Последовательность технологических операций по выключению может выглядеть следующим образом.

Если процесс закончен необходимо закрыть затвор между рабочей камерой и диффузионным насосом. Затем нужно снять нагрев диффузионного насоса и выключить измерительные приборы; провести напуск газа в камеру и анализ покрытия.

Алгоритм выключения установки рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- производится выключение измерительной аппаратуры;
- закрывается вентиль на входе диффузионного насоса. Выключается нагреватель диффузионного насоса. Выдерживается время ~ 40 мин для остывания диффузионного насоса;

- закрываются вентили на выходе диффузионного насоса;
- выключается форвакуумный насос;
- проводится напуск газа в механический насос
- выключается охлаждение установки.

Вакуумная система всегда будет работать, если на выходе диффузионного насоса поддерживать давление не более 10 Па (10^{-1} мм рт ст). Высоковакуумный (диффузионный) насос часто не обеспечивает предельный вакуум по следующим причинам:

- 1) мало масла в насосе. Рекомендуется 70 грамм на 100 литров откачки;
- 2) масло потеряло фракционирующие свойства из-за окисления;
- 3) насос долго не работал, и в нем адсорбировалось много газа;
- 4) в насос попали органические материалы (пластик, пластилин, мусор из вакуумной камеры);
- 5) смонтированы плохо очищенные материалы (особенно резьбовые соединения);
- б) в вакуумной системе появилась течь.

При составлении вакуумной схемы следует учесть, что все вакуумные схемы и установки подобны и строятся по одному принципу: рабочая камера откачивается высоковакуумным насосом, а газ уплотняется до атмосферного давления. Каждый элемент вакуумной системы должен содержать вентиль для коммутации, датчик давления, а кое – где натекагель для напуска газа. Рекомендуется сравнивать результаты расчета проводимости и параметров откачных средств с массогабаритными параметрами этих средств из литературы или с имеющимися в конкретной установке. Следует ознакомиться с сертифицированной продукцией на коммутирующую вакуумную продукцию и провести сравнение с имеющейся на установке.

Методические указания по выполнению профилактических работ

Измерение предельного давления заключается в установление истинной величины давления, полученного в откачиваемом объеме с помощью конкретного насоса. На величину предельного давления влияют:

- состояние внутренних поверхностей насоса и вакуумной системы, т.е. их газовыделение;

- качество и подготовке рабочего вещества насоса, от которых зависит обратный поток углеводородов из насоса;
- величина натекания газа в систему.

В работе можно измерить предельное давление на входе собственно диффузионного насоса при закрытом тарельчатом клапане на его входе, а также при работе насоса на рабочую камеру. В последнем случае мы получаем информацию о динамическом предельном давлении, характеризующем состояние вакуумной системы установки.

Измерение предельного давления производится после выхода диффузионного насоса на рабочий режим. Время выхода с момента включения подогревателя насоса всегда больше расчетного и составляет до 60 минут. Результаты измерений целесообразно фиксировать с помощью самописца. Давление, не изменяющееся в пределах ошибки измерений в течение часа, считается предельным давлением. Если давление меняется скачками – это свидетельствует о недостаточном количестве масла и перегреве высоковакуумного насоса.

Измерение элективной быстроты откачки системы и быстроты действия насосов может производиться методом постоянного объема или методом постоянного давления.

Метод постоянного объема заключается в построении кривых понижения давления в процессе откачки сосуда известного объема и в последующем расчете быстроты откачки по формуле:

$$S_0 = \frac{V}{t} \cdot \ln \frac{P_1' - P_{01}}{P_1'' - P_{01}}$$

где S_0 - эффективная быстрота откачки системы, м³/с;

V - откачиваемый объем, м³;

P_1' - давление в начале рассматриваемого интервала откачки ($t = 0$);

P_1'' - давление в конце рассматриваемого интервала откачки;

P_{01} - наименьшее давление, которое может быть достигнуто в системе (динамическое предельное давление системы)

Метод постоянного объема применим в тех случаях, когда $\tau \geq 10$ ($\tau = V/S_0$ - постоянная скорости откачки системы).

Для определения быстроты действия диффузионных насосов, а также и насосов вращательных широко используется метод постоянного давления. В этом случае измерение быстроты действия сводится к измерению потока газа в системе и давления в заданном сечении. В основе метода лежит постоянство потока откачиваемого газа в любом сечении вакуумной системы:

$$Q' = S_1 \cdot P_1 = S_2 \cdot P_2 = \dots = S_n \cdot P_n = const$$

где индексы 1,2.....n указывает на то, что значение быстроты действия и давления относятся к 1,2.....n-му сечению вакуумной системы.

Формула для вычисления быстроты действия имеет вид:

$$S_i = Q' / P_i$$

где Q' - поток газа, вводимый в измерительный колпак, $\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$;

P_i - давление газа в сечении, в котором измеряется быстрота действия, Па.

Для измерения быстроты действия необходимо откачать объем измерительного колпака до предельного давления. Кран измерительной баретки должен быть открыт. В таком положении кран должен находиться всегда, за исключением момента измерения потока газа. С помощью натекателя устанавливается требуемое давление в измерительном колпаке или на входе насоса. Включается питание отсчетного устройства бюретки и нажимается кнопка «ГОТОВО». Затем кран бюретки перекрывается. За счет убыли количества газа в изолированном от атмосферы объеме бюретки столб масла в измерительном колене начнет подниматься. Затем необходимо произвести вновь повторное измерение для определения среднего значения измеряемой величины.

Фиксируется объем газа, засасываемого вакуумным насосом за определенное время. Необходимо провести несколько измерений, поскольку измерения расхода отличаются большой погрешностью

При измерении быстроты действия с помощью бюретки расчетная формула имеет вид:

$$S_i = \frac{K_{\delta} \cdot n}{P_i \cdot t} ,$$

где K_{δ} - постоянная бюретки, м³·Па / деление;

n - высота подъема столба масла, делений;

t - время подъема столба масла на n делений ($n=15$), с.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ! Нельзя отвлекаться во время проведения измерений и допускать поднятия столба выше отметки.

Так как $n = \text{const}$, $K_{\delta} = \text{const}$, то для расчета быстроты действия удобнее пользоваться формулой:

$$S_i = \frac{\text{const}}{P_i \cdot N} = \frac{9}{P_i \cdot N} ,$$

где N - число импульсов, зарегистрированных счетчиком.

Значение давления P_i в процессе измерения должно быть постоянным. В случае неустойчивых показаний вакуумметров необходимо усреднение трех - пяти отсчетов.

Измерение наибольшего рабочего давления обычно производится в ходе измерения быстроты действия насоса. Измерения производятся следующим образом. С помощью натекателя увеличивается поток газа в откачиваемый объем.

Естественно, что при этом увеличивается давление на входе насоса, при котором возникает неустойчивость в работе, принимается за наибольшее рабочее. Неустойчивость работы высоковакуумного насоса заключается в самопроизвольном периодическом изменении давления на входе при неизменном потоке вводимого газа.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ! При проведении данного эксперимента очень легко привести насос к срыву его работы. Давление на входе насоса резко возрастает на два-три порядка и это приводит к выходу из строя манометрического преобразователя с горячим катодом ПМИ-2. Поэтому, как только возникает срыв, сразу же необходимо выключить накал

преобразователя ПМИ-2 и уменьшить поток вводимого газа путем прикрытия натекателя. После возобновления работы высоковакуумного диффузионного насоса, (о чем можно судить по показаниям датчика на выходе насоса) при давлении на выходе насоса менее 13,3 Па можно вновь включить накал преобразователя ПМИ-2 и продолжить эксперимент.

Измерение наибольшего выпускного давления в зависимости от поставленной цели испытаний может производиться при различных давлениях на входе насоса. При этом за наибольшее выпускное давление принимается такое давление на выходе диффузионного насоса, при котором давление на входе насоса увеличится на 60% и более по сравнению с первоначально установленным.

Испытания проводятся следующим образом. Создается предельное давление в откачиваемом объеме. Перекрывается выпускной клапан насоса и снимается зависимость давления на входе от давления на выходе, вплоть до момента срыва насоса. Зависимость представляется в графической форме и на ней отмечается наибольшее выпускное давление. Доведя насос до срыва, немедленно следует открыть клапан откачки диффузионного насоса.

Суммарный поток натекания и газоотделения в откачиваемый объем необходимо определять после достижения предельного давления. Для определения этого потока следует снять так называемую кривую натекания. Снятие кривой натекания проводится следующим образом. После достижения предельного давления перекрывается тарельчатый клапан на входе диффузионного насоса (затвор) и снимается зависимость изменения давления во времени.

6.3 Аварийные режимы вакуумного оборудования и методы реанимации режимов

Несоблюдение последовательности включения или выключения установки, отключение электричества или воды, приводит к потере служебных характеристик установки.

Ниже приводится перечень наиболее встречающихся неприятностей при работе на установках и возможные приемы реанимации работоспособности:

1) *прекратилась подача воды* - необходимо выключить нагрев диффузионного насоса. Необходимо, чтобы работал механический насос до полного остывания диффузионного насоса;

2) прекратилась подача электроэнергии - необходимо перекрыть все вентили и выключить установку. Остудить диффузионный насос;

3) *забыли включить механический насос*, но включили диффузионный насос. Если прошло не более 10-15 мин необходимо снять нагрев, включить механический насос. Если прошло более 15 мин выключить установку и произвести переборку диффузионного насоса и заменить в нем масло;

4) *забыли открыть воду при запуске диффузионного насоса*. Необходимо снять нагрев диффузионного насоса. Пустить воду в насос после его остывания;

5) *открыли входной или выходной вентиль* работающего диффузионного насоса на атмосферу. Для реанимации необходима замена масла в диффузионном насосе;

6) *выключили форвакуумную откачку* при горячем диффузионном насосе. В этом случае необходимо включить форвакуумный насос и провести откачку горячего диффузионного насоса в течение 2-3 часов. Если по истечении этого времени диффузионный насос не обеспечит рабочий вакуум - провести замену масла в диффузионном насосе;

7) *начали измерение высоковакуумным датчиком ПМИ-2* при форвакууме в вакуумной системе. Последствия - сгорает катод датчика. В этом случае продолжают работать «вслепую», ориентируясь по термодатчику.

Реанимация: по окончании работ и выключении установки провести замену датчика;

8) *выключили форвакуумный насос, не закрыв вакуумные затворы*. После остановки насоса атмосферное давление выдавливает масло из форвакуумного насоса на выход диффузионного насоса. Подмес форвакуумного масла к высоковакуумному приведет к потере работоспособности диффузионного насоса. Если форвакуумный насос двухступенчатый – то выдавливание происходит в течение 5-10 минут. Если насос одноступенчатый – то происходит «выстрел» масла из форвакуумного насоса в диффузионный;

9) *вакуумные затворы закрыли, но не напустили атмосферный воздух в форвакуумный насос. Масло из форвакуумного насоса поднимается до затвора.*

Лечение: провести напуск воздуха во всю вакуумную систему, прокрутить вакуумный насос вручную;

10) *нештатная ситуация:* изменение звука работающего механического насоса, запах масла или горелого провода, прорыв воды внутри установки или в вакуумной камере, оставление ручек и других посторонних предметов и т.п. В этих случаях следует принять меры по выключению установки.

6.4 Инструкции по эксплуатации ЭВМ

Плазма является источником высокочастотных колебаний на различных частотах. Элементы ЭВМ могут выступать антеннами, на которых выделяется высокочастотная мощность. Не рекомендуется располагать ЭВМ вблизи высокочастотных генераторов, ударных установок, разрядных цепей.

Общие правила безопасности

1. К работе за компьютером допускаются студенты, которые знакомы с техникой безопасности.

2. Начинать и заканчивать работу за компьютером студенты могут только по указанию преподавателя.

3. Соблюдайте чистоту и порядок.

4. Бережно относиться к имуществу и технике.

5. Запрещается:

- трогать соединительные провода, электрические розетки;
- самим устранять любые неисправности в работе аппаратуры;
- класть вещи на аппаратуру.

Требования безопасности перед началом занятий

1. Студенты обязаны прослушать инструктаж преподавателя по технике безопасности.

2. Проверить достаточность освещения рабочего места.

3. Перед включением компьютера, техники, аппаратуры проверить визуально исправность шнуров. Обо всех неисправностях сообщать библиотекарю.

Техника безопасности во время занятий

1. Во время занятий будьте внимательны, дисциплинированы, осторожны.

2. Соблюдайте расстояние до экрана монитора —60-70 см

При напряженной длительной работе глаза переутомляются, поэтому каждые 5 минут отрывайте взгляд от экрана и смотрите на что-нибудь, находящееся вдали.

3. За компьютером сидите свободно, без напряжения, не сутулясь, не наклоняясь и не наваливаясь на спинку стула. Ноги ставьте прямо на пол, одна возле другой, не вытягивайте их и не подгибайте. Туловище должно находиться от стола на расстоянии 15 -16 см. Если вы имеете очки для постоянного ношения, работайте в очках. Плечи при работе должны быть расслаблены. Предплечья должны находиться на той же высоте, что и клавиатура.

4. Работать на клавиатуре (технике) разрешается только чистыми, сухими руками; легко нажимая на клавиши, не допуская резких ударов и не задерживая клавиши в нажатом положении.

5. Нельзя трогать питающие провода и разъемы соединительных кабелей, прикасаться к экрану и тыльной стороне монитора, размещать на рабочем месте посторонние предметы, вставать со своих мест, когда в кабинет входят посетители.

6. В случае поломки не пытайтесь самостоятельно устранять неисправности в работе компьютера; при неполадках и сбоях в работе техники немедленно прекратите работу и сообщите об этом преподавателю.

Требования безопасности при аварийных ситуациях

1. При появлении дыма, запаха гари или при пожаре:

- немедленно прекратите работу; сообщите преподавателю;
- соблюдайте спокойствие;
- согласно плану эвакуации покиньте помещение.

2. При прекращении подачи электроэнергии сообщите педагогу, который должен отключить электрооборудование из сети (розетки), оценить ситуацию и в случае необходимости организовать эвакуацию из помещения.

3. Если произошел несчастный случай или при недомогании следует прекратить занятие, сообщить педагогу о случившемся, который должен решить вопрос о дальнейших действиях, сохранить обстановку места происшествия (если это не угрожает здоровью и окружающим).

4. При возникновении пожара сообщите педагогу, который должен отключить подачу электроэнергии на щитке, провести эвакуацию людей.

Список рекомендуемой литературы

1. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие/ А.А. Барыбин. – Физматлит 2006. – 424 с – ISBN 5- 9921-0679-1.
2. Браун Я., Келлер Р, Холмс А и др. Физика и технология источников ионов. – М.: Мир, 1998. – 500 с.
3. Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал нанoeлектроники.//уч. пособие для вузов. Сер.Мир материалов и технологий. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.
4. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А, Величко А.А. Процессы микро– и нанотехнологии. – Томск: ТУСУР, 2005. – 315 с.
5. Розанов Л.Н. Вакуумная техника – М.: Высшая школа, 1990.- 320 с.
6. Орликов Л.Н. Технология и автоматизация производства электронных приборов. – Томск: ТМЦДО, 2001. – Ч.1-2. – 150 с.
7. Орликов Л.Н. Специальные вопросы технологии. – Томск: ТУСУР, 2007.– 229 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Основы вакуумных технологий

Учебное пособие по дисциплине «Основы вакуумных технологий»

Усл. печ. л. Препринт
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г.Томск, пр.Ленина, 40