

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

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

**Т.И. Данилина**

**ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫЕ  
МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР**

*Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов  
высших учебных заведений технических специальностей*

Томск - 2022

Данилина Т.И.

Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур. Методические указания по выполнению лабораторных работ для студентов высших учебных заведений технических специальностей. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2022. – 28 с.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ.....	6
2. ВАКУУМНЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ.....	9
3. ОСАЖДЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ И ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ.....	15
4. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСЛОЕВ.....	23

## ВВЕДЕНИЕ

Основными разделами дисциплины «Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур» для подготовки студентов высших учебных заведений технических специальностей являются:

- Основы вакуумной техники;
- Термическое испарение в вакууме;
- Ионно-плазменные методы получения нанослоев;
- Активируемые плазмой методы получения нанослоев.

В соответствии с этим содержанием студенты выполняют следующие лабораторные работы:

- 1) Механические вакуумные наносы для предварительной откачки вакуумной установки.
- 2) Вакуумные напылительные установки.
- 3) Осаждение резистивных и проводящих пленок методом термического испарения в вакууме.
- 4) Ионно-плазменный метод получения нанослоев.

К вакуумному технологическому оборудованию предъявляются ряд общих требований, в соответствии с которыми оно должно обеспечивать:

- необходимое разряжение (вакуум) в рабочей камере установки в течение всего технологического процесса;
- безопасность работы обслуживающего персонала и студентов;
- высокую производительность.

Необходимое разряжение в рабочей камере создается средствами откачки атмосферного воздуха из всего объема камеры и зависит от параметров и исправной работы этих средств. Выполнение второго требования в значительной мере зависит от конструктивных особенностей оборудования и от правильности эксплуатации.

Основными средствами, служащими для создания вакуума в рабочей камере технологической установки являются вакуумные насосы. По степени разряжения, которую можно получить в откачиваемом объеме с их помощью, насосы можно разделить на три основных класса:

1. Форвакуумные насосы (насосы предварительного разряжения), позволяющие производить откачку от атмосферного давления  $10^5$  до  $10^{-1}$  Па.
2. Высоковакуумные насосы, создающие разряжение газа в объеме от 1 до  $10^{-4}$  Па.
3. Сверхвысоковакуумные насосы, создающие разряжение газа до давления  $10^{-11}$  Па.

Таким образом, высокий и сверхвысокий вакуум может быть получен в результате многоступенчатой откачки. Для соответствующих диапазонов давлений используются различные средства измерения вакуума.



Целью цикла этих лабораторных работ является приобретение студентами практических навыков работы на вакуумном технологическом оборудовании для получения нанослоев различными методами.

Лабораторные работы выполняются на реальном оборудовании (универсальные установки вакуумного напыления УВН-2М) с использованием современного измерительного оборудования (микроскопы стерео – МС-1, микроинтерферометр – МИИ-4М, растровый электронный микроскоп).

Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Вакуумно-плазменные методы получения наноструктур» представляют собой описания лабораторных работ с краткими теоретическими сведениями и порядком выполнения работ. В методических указаниях сформулирована для каждой работы цель и требования к отчету, приводится рекомендуемый список литературы.

# 1. МЕХАНИЧЕСКИЕ ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОТКАЧКИ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ

## 1.1 Цель работы

1.1.1 Изучить принцип действия механического насоса объемного типа с масляным уплотнением (макет);

1.1.2 Получить экспериментальную кривую откачки;

1.1.3 Рассчитать параметры установки.

## 1.2 Краткие теоретические сведения

Механические вакуумные насосы объемного типа с масляным уплотнением предназначены для обеспечения и поддержания в откачиваемом объеме низкого и среднего вакуума. Действие этих насосов основано на периодическом поступлении в рабочую камеру насоса откачиваемого газа и выталкивании его путем сжатия при уменьшении объема рабочей камеры.

Любые насосы независимо от принципа действия характеризуются следующими общими параметрами:

1) наибольшее давление запуска вакуумного насоса  $p_3$  - наибольшее давление во входном сечении насоса, при котором он может начать работу;

2) наибольшее выпускное давление вакуумного насоса  $p_{\text{вып}}$  - наибольшее давление в выходном сечении насоса, при котором он может осуществлять работу;

3) предельное или остаточное давление насоса  $p_{\text{пр}}$  - это минимальное давление, которое может обеспечить насос в процессе длительной откачки. Быстрота действия насоса при приближении к предельному давлению стремится к нулю. Предельное давление большинства вакуумных насосов определяется равновесием между откачиваемым потоком газа и обратными потоками газа из вредного пространства, вследствие растворимости газа в масле насоса, газоотделения со стенок насоса и т.д.;

4) быстрота действия  $S_{\text{н}}$  - это объем газа при данном давлении, откачиваемый в единицу времени. Быстрота откачки относится к сечению, в котором измерено давление;

5) производительность вакуумного насоса - это поток газа во входном сечении насоса при данном давлении.

Кроме этих основных параметров существуют дополнительные эксплуатационные параметры насосов.

Быстрота откачки насоса  $S_{\text{н}}$  определяется как объем газа  $dV_{\text{н}}$ , удаляемый за единицу времени при том давлении, которое существует на входе насоса  $p_{\text{вх}}$

$$S_{\text{н}} = \frac{dV_{\text{н}}}{dt}$$

С другой стороны, быстрота откачки есть отношения потока газа  $Q$ , откачиваемого насосом, ко входному давлению

$$S_{\text{н}} = \frac{Q}{p_{\text{вх}}}$$

Быстрота откачки в широкой области рабочих давлений обычно не зависит от давления.

Производительность насоса определяется как

$$Q = p_{\text{вх}} S_{\text{н}} \quad (1.1)$$

Быстрота откачки объекта  $S_0$  – это объем газа при данном давлении  $p_0$ , откачиваемый в единицу времени через сечение вакуумного трубопровода, соединяющего объект откачки с насосом

$$S_0 = \frac{Q}{p_0}$$

где  $Q$  – поток газа, проходящий через трубопровод.

Величина  $S_0$  получила название эффективной скорости откачки.

Вакуумный трубопровод характеризуется проводимостью  $U$

$$U = \frac{Q}{p_1 - p_2}$$

где  $(p_1 - p_2)$  – разность давлений на концах трубопровода.

Быстроту откачки  $S_0$  определяют по быстроте действия насоса  $S_{\text{н}}$  и проводимости  $U$  трубопровода, соединяющего насос с объектом, при условии постоянства потока газа  $Q = \text{const}$ . Из условия

$$Q = S_0 p_0 = U(p_0 - p_{\text{вх}}) = S_{\text{н}} p_{\text{вх}} = \text{const}$$

следует

$$\frac{1}{S_0} = \frac{1}{S_{\text{н}}} + \frac{1}{U}$$

Или

$$S_0 = \frac{S_{\text{н}} \cdot U}{S_{\text{н}} + U} \quad (1.2)$$

Уравнение (1.2) представляет собой основное уравнение вакуумной техники, которое выражает отличие быстроты откачки объекта  $S_0$  от быстроты действия насоса  $S_{\text{н}}$  при наличии трубопровода проводимостью  $U$ . При  $U \gg S_{\text{н}}$  влияние трубопровода незначительно и  $S_0 \approx S_{\text{н}}$ ; при  $U \ll S_{\text{н}}$  быстрота откачки объекта определяется проводимостью трубопровода, т.е.  $S_0 \approx U$ .

Коэффициент использования насоса  $K_{\text{и}}$  определяется:

$$K_{\text{и}} = \frac{S_0}{S_{\text{н}}}$$

Он может меняться от 1 до 0 в зависимости от проводимости трубопровода.

### 1.3 Методика выполнения лабораторной работы

Для определения быстроты откачки механических насосов пригоден метод постоянного объема. Насос присоединяют к объему  $V$ , большому для замедления падения давления, через трубопровод с большой пропускной способностью. В этом случае имеем

$$S_{\text{н}} = 2,3 \frac{V}{\Delta t} \cdot \lg \frac{p_1}{p_2}, \quad (1.3)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  – два значения давления газа на измеренной зависимости падения давления во времени;

$\Delta t$  – интервал времени.

В этом методе получают усредненные значения величины  $S_n$  для интервала давлений от  $p_1$  до  $p_2$ . При приближении к предельному давлению (при давлениях  $p \leq 10p_{пр}$ ) расчет величины  $S_n$  следует производить с помощью соотношения

$$S_n = \frac{2,3 \cdot V}{\Delta t} \cdot \lg \left( \frac{p_1 - p_{пр}}{p_2 - p_{пр}} \right) \quad (1.4)$$

Определение характеристик механических вакуумных насосов с масляным уплотнением осуществляют на вакуумной установке, принципиальная схема которой показана на рис. 1.1.

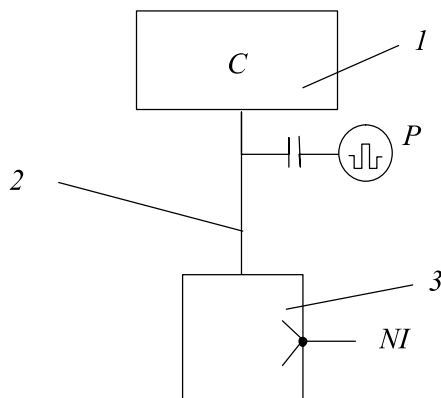


Рис. 1.1 Схема экспериментальной установки: I – камера вакуумная; 2 – трубопровод; 3 – механический вакуумный насос; P – вакуумметр

На экспериментальной установке давление газа измеряется при высоких давлениях деформационным вакуумметром, а при более низких – тепловым вакуумметром. Чаще всего датчики вакуумметров подсоединены к рабочему объему, тогда кривая откачки будет показывать изменение давления в рабочем объеме. Поэтому с использованием этой зависимости можно определить эффективную скорость откачки рабочего объема по формуле (1.3). Объем рабочей камеры установки УВН-2М равен  $0,12 \text{ м}^3$ .

#### 1.4 Порядок выполнения работы

1.4.1 Определить тип насоса на экспериментальной установке;

1.4.2 Определить по справочнику параметры данного насоса;

1.4.3 Получить экспериментальную зависимость давления от времени откачки для рабочего объема;

1.4.4 Рассчитать быстроту действия откачки  $S_0$  на всем диапазоне давлений,  $K_n$  и определить предельное давление для рабочего объема.

#### 1.5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) основные расчетные соотношения;

2) схему вакуумной установки;

- 3) экспериментальную кривую откачки и расчеты;
- 4) расчетные параметры;
- 5) выводы

### 1.6 Рекомендуемая литература

1.6.1 Вакуумная техника: Справочник // под ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. – М.: Машиностроение, 1985. -360с.

1.6.2 Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: ВШ, 1990. – 320 с.

1.6.3. Данилина Т.И., Макрушин А.С. Вакуумная техника.-ТУСУР, 2008.- 94 с.

## 2. ВАКУУМНЫЕ НАПЫЛИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

### 2.1. Цель работы

2.1.1. Изучить вакуумную напылительную установку УВН-2М.

2.1.2.Изучить инструкции по эксплуатации термомпарных и ионизационных вакуумметров.

2.1.3.Выполнить индивидуальное задание по работе на установке.

### 2.2. Принцип работы установки УВН-2М

Схема экспериментальной установки представлена на рис.2.1.

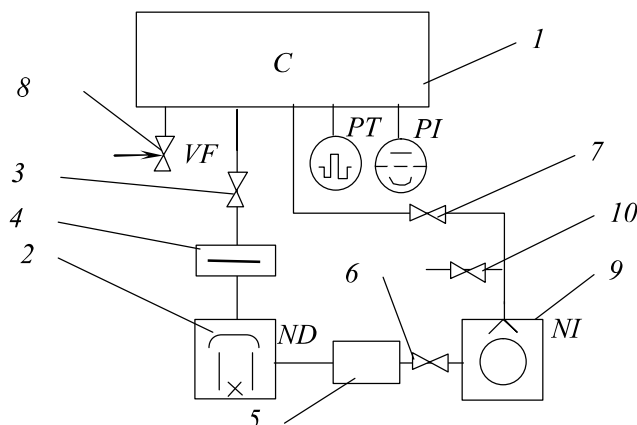


Рис. 2.1 Схема вакуумная установки: 1 – рабочий объем; 2 – высоковакуумный насос; 3 – затвор; 4 – ловушка; 5 – форбаллон; 6 – вентиль основной линии откачки; 7 – вентиль вспомогательной линии откачки; 8 – натекатель; 9 – механический форвакуумный насос; 10 – клапан напуска форвакуумного насоса; P – вакуумметры

В рабочем объеме 1 высокий вакуум создаётся насосом 2, который подсоединяется к объему через вентиль 3 (вакуумный затвор) и ловушку 4. Ловушка чаще всего охлаждается азотом и снижает обратный поток паров рабочей жидкости (масла) из высоковакуумного насоса в откачиваемый объем 1. Насос 9 обеспечивает получение предварительного разряжения, и подключается к высоковакуумному насосу 2 через вентиль 6. Клапан 10 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки, чтобы предотвратить попадание рабочей жидкости форвакуумного насоса в высоковакуумный насос.

В типовой вакуумной системе предусмотрены две линии откачки: основная для получения высокого вакуума в технологическом объеме и вспомогательная для предварительной откачки перед включением основной

линии. Основная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый затвор 3 – ловушка 4 – высоковакуумный насос 2 – форбаллон 5 – открытый клапан 6 – форвакуумный насос 9 (клапан 7 – закрыт). После проведения технологического процесса необходимо произвести напуск атмосферы в рабочий объем 1 через натекаатель 8. С этой целью предварительно необходимо отключить вакуумную систему от технологического объема, перекрыв затвор 3.

После загрузки рабочего объема в нем необходимо создать предварительное разряжение, что делается с помощью вспомогательной линии. С этой целью закрываем натекаатель 8, и клапан 6, а клапан 7 открываем. Вспомогательная линия откачки: рабочий объем 1 – открытый клапан 7 – форвакуумный насос 9. На момент работы вспомогательной линии функцию форвакуумного насоса для высоковакуумного насоса выполняет форбаллон 5. По вспомогательной линии рабочий объем откачивается до давления, достаточного для запуска высоковакуумного насоса. При достижении этого давления, необходимо последовательно закрыть клапан 7, открыть клапан 6, а затем открыть затвор 3 и продолжать откачивать объем по основной линии откачки.

Форвакуумный насос типа ВН-461М предназначен для получения низкого вакуума до 1 Па. Высокий вакуум обеспечивается с помощью паромасляного диффузионного насоса. Особенность работы диффузионного паромасляного насоса заключается в том, что перед его включением необходимо во всей системе создать вакуум ниже 10 Па, а во время его работы форвакуумный насос должен производить непрерывную откачку. Для нормальной работы диффузионный насос во время откачки охлаждается водой. Нагреватель насоса включается только после подачи воды.

**ВНИМАНИЕ!** Во время работы диффузионного насоса нельзя допускать напуска атмосферного воздуха в рабочий объем при открытом затворе, так как при этом масло окисляется и теряет вакуумные свойства.

### *2.3. Измерение низких давлений газа*

Для измерения низких давлений вакуумная техника использует несколько типов манометров, действие которых основано на различных физических принципах. Остановимся только на тех, которые используются в лаборатории. Вакуумметр ионизационно-термопарный типа ВИТ-1А представляет собой комбинированную измерительную установку, состоящую из ионизационной манометрической лампы типа ЛМ-2, термопарных манометрических ламп типа ЛТ-2 и ЛТ-4М и измерительного блока.

Термопарные манометры применяются для измерения давлений разряженных газов в интервале от 100 Па до  $10^{-1}$  Па. Действие этих манометров основано на зависимости теплопроводности газа от его плотности, т.е. от количества молекул в единице объема, способных своим движением переносить тепло. Если в откачиваемый объем поместить нагретую длинную металлическую нить, то отвод тепла от нее к холодным стенкам сосуда будет в значительной мере определяться теплопроводностью окружающего нить газа. Схема термопарного вакуумметра представлена на рис.2.2.

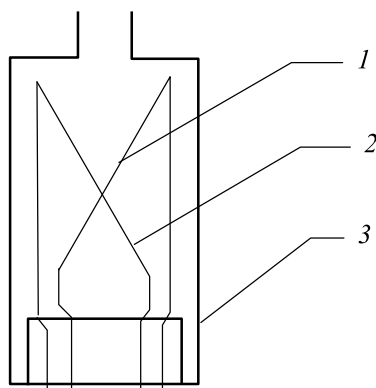


Рис.2.2 Схема термопарного вакуумметра: 1 – нагреватель; 2 – термопара; 3 корпус

В данном манометре термопара 2 своим спаем приварена к нагревателю 1. При неизменном токе накала нагревателя в результате изменения давления меняется температура спаев, следовательно, и термо-э.д.с., по величине которой судят о давлении. На протяжении всей работы ток нагревателя должен поддерживаться неизменным.

Для того, чтобы по величине термо-э.д.с. судить о давлении в системе, необходимо пользоваться градуировочной кривой (рис.2.3.). Максимальная термо-э.д.с., развиваемая термопарой, равна 10 мВ, что соответствует давлению  $1 \cdot 10^{-2}$  Па.

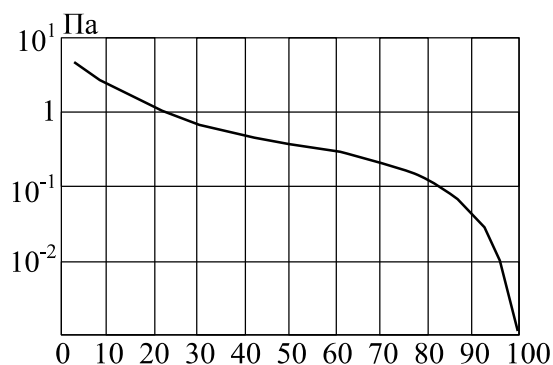


Рис.2.3 Градуировочная кривая термопарного вакуумметра

**ВНИМАНИЕ!** Перед включением вакуумметра необходимо убедиться, что накал ионизационной лампы ЛМ-2 выключен.

Измерение давления с термопарной лампой ЛТ-2 производится следующим образом. Поставить переключатель «Ток накала – Измерение» в положение «Ток накала» и реостатом «Регулировка тока накала» установить рабочий ток нагревателя данной термопарной лампы. Поставить переключатель «Ток накала – Измерение» в положение «Измерение» и сделать отсчет в милливольтках. Затем этот отсчет перевести в единицы давления (мм рт.ст.) по градуировочной кривой термопарной лампы ЛТ-2 или ЛТ-4М.

Ионизационные манометры применяются для измерения давления газов в диапазоне  $10^{-1} - 10^{-5}$  Па. Конструкция ионизационного манометра напоминает устройство электронной лампы (рис. 2.4, а)

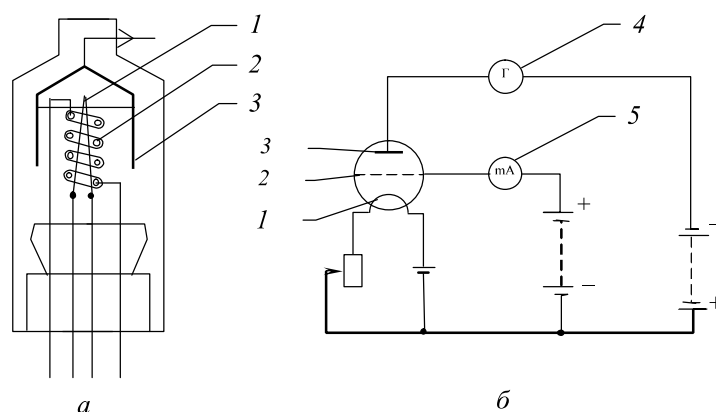


Рис. 2.4 Ионизационный манометр: *а* – внешний вид, *б* – схема включения

*1* – термокатод; *2* – сетка; *3* – коллектор ионов; *4* – гальванометр; *5* – миллиамперметр

Накальный катод *1* эмиттирует электроны, которые ускоряются положительным напряжением сетки *2*. Электроны, пролетающие через редкие витки сетки, отталкиваются отрицательно заряженным коллектором *3*. Совершая колебательные движения около сетки, электроны сталкиваются с атомами и молекулами газа, ионизуют их и в конце концов попадают на сетку. Положительные ионы притягиваются отрицательно заряженным коллектором. Число образовавшихся ионов пропорционально плотности газа. Поэтому ток в цепи коллектора пропорционален давлению в системе, к которой присоединен баллон манометрической лампы. На рис. 2.4, *б* представлена упрощенная схема включения измерительного блока.

Перед включением ионизационной части вакуумметра необходимо убедиться с помощью термодарного манометра, что давление в рабочей камере не выше  $10^{-1}$  Па.

**ВНИМАНИЕ!** Включение ионизационной манометрической лампы ЛМ-2 при давлении выше  $10^{-1}$  Па может привести к преждевременному выходу ее из строя.

Измерения с ионизационным манометром производить следующим образом:

1. Поставить правый верхний переключатель в положение «Прогрев», средний переключатель под прибором – в положение «Установка нуля», переключатель под прибором М24-206 – в положение «Эмиссия».

2. Включить сеть переключателем «Сеть 220 В» и прогреть прибор в течение 2-3 минут.

3. Отрегулировать усилитель ионного тока. Для этого необходимо поставить переключатель под прибором вакуумметра ионизационного в положение «Измерение», переключатель множителя шкалы – в положение «Установка нуля» и потенциометром «Регулировка нуля» установить стрелку измерительного прибора на нуль шкалы.

4. Термодарной частью вакуумметра проверить давление в откачиваемой системе. Если давление ниже  $10^{-1}$  Па, то можно подготовить ионизационную часть вакуумметра к измерению давления. Для этого



необходимо поставить переключатель «Множитель шкалы» положение « $10^{-4}$ », переключатель под прибором – в положение «Эмиссия».

5. Переключателем «Накал» включить накал ионизационной манометрической лампы ЛМ-2.

6. После прогрева сетки ионизационной манометрической лампы в течении 10-15 минут надо правильно установить ток эмиссии ионизационной манометрической лампы, для этого необходимо верхний правый переключатель перевести из положения «Прогрев» в положение «Измерение» и потенциометром «Установка эмиссии» перевести стрелку прибора на 50 мкА.

7. Перевести переключатель в положение «Измерения», установить стрелку ручкой потенциометра «Установка нуля» в нулевое положение.

8. Установить переключатель в положение соответствующее давлению в вакуумной камере, при котором отсчет по измерительному прибору будет лежать в пределах от 10 до 100% шкалы.

#### *2.4. Методические указания по эксплуатации установки УВН-2М*

К работе на установке допускаются только те студенты, которые прошли инструктаж и расписались в журнале по ТБ.

Проверку электрической цепи можно производить только при отключенной установке в присутствии преподавателя.

Запуск установки:

1. Включить воду. В надежности включения убедиться по интенсивности вытекания воды из сливного шланга.

2. Тумблер «Сеть» повернуть в положение «вкл.»

3. Проверить, что все линии откачки перекрыты.

4. Тумблер «Форвакуумный насос» нажать в положение «вкл.»

5. Тумблер «Холодная вода» нажать в положение «вкл.»

6. Открыть вентиль 6, и тумблер «Диффузионный насос» в положение «вкл.»

Откачка рабочего объема:

1. Перекрыть вентиль 6, открыть вентиль 7.

2. При достижении давления в рабочем объеме ниже  $10^1$  Па (красная черта на шкале вакуумметра). перекрыть вентиль 7 и открыть вентиль 6.

3. Открыть затвор.

Напуск в рабочий объем атмосферы:

1. Закрыть затвор.

2. Открыть натекагель 8.

#### *2.5. Индивидуальные задания*

Необходимо составить последовательность операций при выполнении индивидуального задания (техмаршрут).

##### **ЗАДАНИЕ №1**

Необходимо установить подложки и испарители в рабочей камере, произвести напыление.

Исходное состояние установки: в рабочей камере – высокий вакуум, работают оба насоса, откачка по основной линии.

##### **ЗАДАНИЕ №2**

Необходимо получить в рабочем объеме высокий вакуум, произвести напыление и извлечь подложки из камеры.

Исходное состояние установки: откачка производится по вспомогательной линии, оба насоса включены, в рабочем объеме – предварительное разряжение.

#### ЗАДАНИЕ №3

Необходимо загрузить подложки и установить испарители, произвести напыление в высоком вакууме.

Исходное состояние установки: установка выключена, насосы не работают.

#### ЗАДАНИЕ №4

Необходимо произвести напыление в высоком вакууме и извлечь подложки.

Исходное состояние установки: откачка производится по основной линии откачки с открытым вакуумным затвором, высоковакуумный насос не работает.

#### ЗАДАНИЕ №5

Необходимо установить подложки и испарители и произвести напыление в высоком вакууме.

Исходное состояние установки: откачка по основной линии с закрытым вакуумным затвором, работают оба насоса.

#### ЗАДАНИЕ №6

Необходимо произвести напыление и извлечь подложки из рабочей камеры.

Исходное состояние установки: откачка по вспомогательной линии, высоковакуумный насос не работает.

#### ЗАДАНИЕ №7

Необходимо произвести напыление пленок и извлечь подложки.

Исходное состояние установки: в рабочем объеме – предварительное разряжение, откачка по вспомогательной линии, высоковакуумный насос не работает.

#### ЗАДАНИЕ №8

Выключение вакуумной установки без развакуумирования рабочего объема.

Исходное состояние установки: в рабочем объеме – высокий вакуум, работают оба насоса.

#### 2.6. Порядок выполнения работы

1) Изучить устройство вакуумной напылительной установки УВН-2М с указанием конкретных типов насосов и датчиков давления.

2) Составить последовательность технологических операций в соответствии с индивидуальным заданием и получить допуск у преподавателя. На каждой операции следует указывать давление газа и время откачки.

#### 2.7. Содержание отчета

В отчете необходимо представить:

1. Схему установки УВН-2М.
2. Параметры насосов.

3. Техмаршрут в соответствии с индивидуальным заданием.
4. Параметры установки УВН-2М, которые были получены в экспериментах.

### 3. ОСАЖДЕНИЕ РЕЗИСТИВНЫХ И ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОГО ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ

#### 3.1 Цель работы

Приобрести практические навыки напыления пленок методом термического испарения в вакууме. Освоить методику измерения толщины пленок с помощью микроинтерферометра МИИ-4М.

#### 3.2 Описание вакуумной установки:

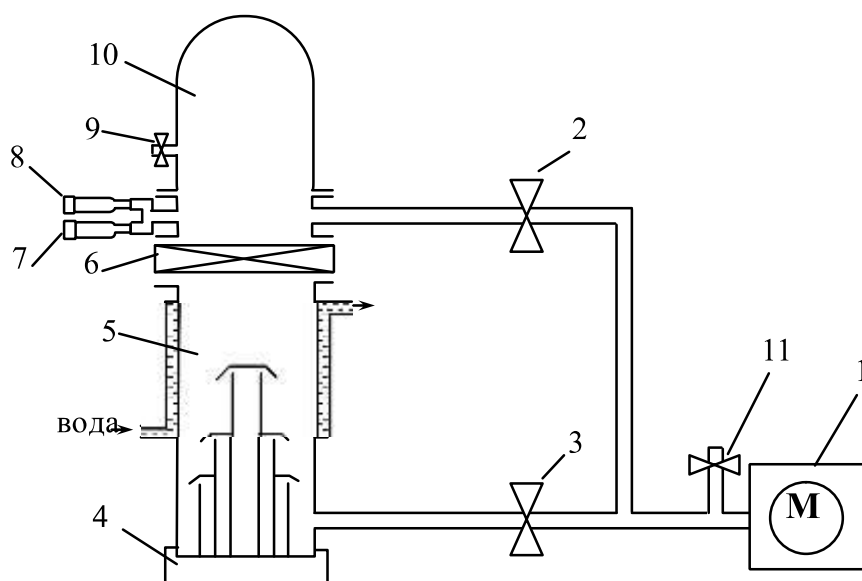


Рис. 3.1 – Схема вакуумной установки УВН-2М: 1- механический (форвакуумный) насос; 2 – вентиль вспомогательной линии откачки; 3 – вентиль основной линии откачки; 4 – нагреватель диффузионного насоса; 5 – диффузионный насос; 6 – вакуумный затвор; 7 – термопарный вакуумметр; 8 – ионизационный вакуумметр; 9 – натекатель; 10 – вакуумная камера (колпак); 11 – клапан.

Установка УВН-2М предназначена для откачки газа из вакуумной камеры 10 до предельного давления ( $10^{-3} - 10^{-4}$ ) Па с целью напыления металлических и диэлектрических покрытий. Для достижения данного давления используется двухступенчатая система откачки, состоящая из механического насоса 1 и диффузионного насоса 5. Для коммутации насосов используются вентили 2, 3 и вакуумный затвор 6. Форвакуумный насос 1 типа ВН-461М предназначен для получения низкого вакуума до (1 – 10) Па. Высокий вакуум обеспечивается с помощью паромасляного диффузионного насоса 5. Особенность работы диффузионного паромасляного насоса заключается в том, что перед его включением необходимо во всей системе создать вакуум ниже 10 Па, а во время его работы форвакуумный насос должен производить непрерывную откачку. Для нормальной работы диффузионный насос во время откачки

охлаждается водой. Нагреватель насоса включается только после подачи воды. Клапан 11 применяется для напуска атмосферного воздуха в механический насос во время его остановки, чтобы предотвратить попадание рабочей жидкости форвакуумного насоса в высоковакуумный насос или в систему трубопроводов.

**ВНИМАНИЕ!** Неверная коммутация вентиляей 2,3 и затвора б при откачке и развакуумировании вакуумной камеры, может привести к попаданию атмосферного воздуха в диффузионный насос при его работе. Это вызовет окисление вакуумного масла, находящегося в диффузионном насосе, и потере им вакуумных свойств. Поэтому важно соблюдать правильную последовательность управления вентилями 2, 3 и затвора б при работе с вакуумной установкой.

#### *Включение вакуумной установки*

Исходное состояние: вентили 2,3 и затвор 4 закрыты, в рабочей камере остаточная атмосфера, питание установки отключено.

1. Включить водяное охлаждение диффузионного насоса. В надежности включения убедиться по интенсивности вытекания воды из сливного шланга.
2. Включить тумблер «СЕТЬ» на панели управления.
3. Проверить, что вентили 2,3 и затвор б перекрыты.
4. Тумблер «Форвакуумный насос» нажать в положение «вкл». Включение механического насоса сопровождается характерным жужжанием электродвигателя. Тумблер «Форвакуумный насос» имеет световую индикацию включения, расположенную над ним.
5. Открыть вентиль основной линии откачки 3.
6. Тумблер «Диффузионный насос» нажать в положение «вкл». Тумблер «Диффузионный насос» имеет световую индикацию включения, расположенную над ним.

Время разогрева диффузионного насоса составляет около 30 мин.

#### *Загрузка образцов и откачка вакуумной камеры*

1. Подготовить образцы для напыления и надежно закрепить их в подложкодержателе.
2. Проверить, что вакуумный затвор б полностью закрыт.
3. Натекателем 9 напустить воздух в вакуумную камеру 10, до полного прекращения шипения.
4. Поднять колпак 10 до упора и повернуть его по часовой стрелке на угол 30 - 90°.
5. Загрузить образцы в вакуумную камеру и надежно их закрепить на подвижной «карусели».
6. Убедиться в наличии испаряемого вещества на испарителе.
7. Опустить колпак.
8. Закрыть натекатель 9 до упора.
9. Закрыть вентиль основной линии откачки 3.
10. Открыть вентиль вспомогательной линии откачки 2. Откачать рабочий объем до давления ниже  $10^{-1}$  мм рт. ст. Контроль за давлением осуществлять

по термопарному вакуумметру 7. Данное давление отмечено красной чертой на шкале термопарного вакуумметра. Время откачки по вспомогательной линии не должно превышать 20 минут.

*Примечание:* если планируется использовать ионно-плазменный метод распыления, то во время откачки по вспомогательной линии необходимо осуществить продувку капилляра рабочим газом. Для этого необходимо открыть баллон с рабочим газом и открыть вентиль подачи рабочего газа на 15-20 секунд. Это исключит возможность присутствия в капилляре, по которому проходит рабочий газ, посторонних газов.

1. При достижении давления в рабочем объеме ниже  $10^{-1}$  мм рт. ст. (красная черта на шкале термопарного вакуумметра), закрыть вентиль вспомогательной линии откачки 2 и открыть вентиль основной линии откачки 3.

2. Через 5 – 10 секунд открыть затвор 6.

3. Откачать рабочий объем до «зашкаливания» термопарного вакуумметра (соответствует давлению  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст.). Для дальнейшего измерения давления в рабочем объеме необходимо включить ионизационный вакуумметр 8.

*Порядок включения ионизационного вакуумметра*

4. Убедиться в то, что давление в рабочей камере ниже  $10^{-4}$  мм рт. ст. (термопарный вакуумметр зашкалил).

5. Включить тумблер «СЕТЬ» и тумблер «НАКАЛ» на приборе.

6. Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «НАГРЕВ» (крайнее левое положение переключателя). Прогреть ионизационный вакуумметр в течении 5-10 минут.

7. Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «ОБЕЗГАЗИВАНИЕ». 5-10 минут.

8. Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА ЭМИССИИ». Вращением ручки-регулятора установки эмиссии, установить эмиссию на отметку 50 мкА по шкале прибора.

9. Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «ИЗМЕРЕНИЕ».

10. Вращением ручки-регулятора установки нуля, установить нуль на приборе.

11. Переключать переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» до появления показаний на приборе. Если отклонение стрелки менее 10 единиц на шкале прибора, то можно переключить на следующий предел.

12. Определить давление в вакуумной камере по формуле:

$$P \text{ (мм рт. ст.)} = \text{показание прибора} \cdot \text{множитель шкалы} \cdot 10^{-4}$$

*Отключение ионизационного вакуумметра*

Ионизационный вакуумметр выключают при любых изменениях давления выше, чем  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. (развакуумирование рабочей камеры, напуск рабочего газа для ионно-плазменного распыления). Однако, перед подобными действиями, необходимо дать остыть ионизационной лампе в

течении 5-10 мин. Ионизационный вакуумметр выключается в обратном порядке.

1. Переключатель «МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА НУЛЯ» (исходное состояние, крайне левая позиция).

2. Переключатель «РОД РАБОТЫ» перевести в положение «УСТАНОВКА ЭМИССИИ». Вращением ручки-регулятора установки эмиссии, установить эмиссию на минимально возможное значение.

3. Отключить тумблер «НАКАЛ» и тумблер «СЕТЬ»

4. Дать прибору остыть в течении 5-10 минут.

При достижении технологического вакуума порядка  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. можно производить напыление пленок методом термического испарения в вакууме и ионно-плазменным распылением.

*3.3 Методика напыления пленок методом термического испарения в вакууме.*

Метод термического испарения в вакууме возможен, если температура испарения вещества ниже 1500 °С. Методом термического испарения в вакууме напыляют следующие материалы: Cu, Al, Au, Ag, Ni, In. Методика термического напыления:

1. Включить охлаждения тоководов. Переключить переключатель в положение «ХОЛ. ВОДА» на панели управления.

2. Включить тумблер «ИСПАРИТЕЛЬ».

3. Плавно подать ток на испаритель, вращая ручку «ТОК ИСПАРИТЕЛЯ» на панели управления. Ток через испаритель контролируется стрелочным прибором «ТОК ИСПАРИТЕЛЯ», расположенным над ручкой-регулятором. Ток подается очень плавно с шагом 2-4 Ампер до начала разогрева испарителя. При этом необходимо помнить, что процесс разогрева инерционен и требует некоторого времени. Ток, при котором испаритель полностью разогревается, зависит от материала и формы испарителя (20-50 А).

4. После начала испарения вещества, установить подложку над испарителем и осуществить напыление в течении требуемого времени. Затем отвести подложку в сторону.

5. Снизить ток испарителя до нуля.

6. Отключить тумблер «ИСПАРИТЕЛЬ».

7. Через 2-3 минуты отключить охлаждение тоководов. Переключить тумблер «ХОЛ. ВОДА» в среднее (исходное) положение.

После отключения испарителя он должен остыть в течении 5-10 минут в условиях высокого вакуума. Развакуумирование вакуумной камеры и извлечение образцов возможно только после охлаждения.

*3.4. Термическое испарение в вакууме*

Суть метода заключается в нагреве вещества до температуры испарения, его испарении и последующей конденсации в вакууме на подложке. Получение пленок возможно только при низких давлениях в вакуумных установках.

В условиях высокого вакуума материал, помещенный в испаритель, разогревается и испаряется, в результате чего молекулы вещества движутся к

подложке, где они конденсируются, образуя пленку. Процесс осуществляется внутри камеры, связанной с непрерывно работающей системой откачки воздуха.

Для осуществления процесса термического испарения в вакууме необходимо обеспечить следующие основные условия: достаточно интенсивное испарение материала, направленный молекулярный поток к подложке и конденсацию пара на подложке.

Уже при давлении  $p_e = 10^{-2}$  Па средняя длина свободного пробега молекул испаряемого вещества составляет 50 см, что превышает реальное расстояние от испарителя до подложки (обычно не более 20 см).

Таким образом, для создания прямолинейных траекторий движения молекул вещества в пространстве между испарителем и подложкой необходимо давление остаточного газа порядка  $10^{-2} - 10^{-3}$  Па.

Давление пара испаряемого вещества  $p_s$ , соответствующее равновесному состоянию системы, называется давлением насыщенного пара или его упругостью. Практика показывает, что процессы осаждения происходят с достаточной для производства скоростью, если упругость пара вещества составляет 1,33 Па и более. Температура вещества, при которой  $p_s = 1,33$  Па, называется условной температурой испарения.

Скорость испарения  $W_u$ , т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется:

$$W_u = p_s \sqrt{\frac{m}{2\pi k T_u}},$$

где  $p_s$  - давление насыщенного пара, Па;

$m$  - масса молекулы, кг;

$k$  - постоянная Больцмана, Дж/К;

$T_u$  - температура испарения, К.

Скорость конденсации  $W_k$ , т.е. количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от конфигурации испарителя и подложки. На практике определяют скорость  $W_k$ , как скорость нарастания толщины пленки  $d$  за время  $t$ :

$$W_k = \frac{d}{t}$$

На плоской подложке, расположенной параллельно поверхности испарителя, скорость конденсации при испарении из поверхностного испарителя малой площади определяется (рис. 3.2):

$$W_k = \frac{W_u d S_1}{\pi \gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}.$$

Для точечного испарителя

$$W_k = \frac{W_u dS_1}{4\pi\gamma} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}},$$

где  $W_u$  - скорость испарения,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;

$dS_1$  - площадь испарителя,  $\text{м}^2$ ;

$\gamma$  - плотность испаряемого вещества,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$x, y$  - координаты точки, в которой определяется  $W_k$ , м;

$h$  - расстояние от испарителя до подложки, м.

Методом термического испарения в вакууме получают пленки таких материалов, которые имеют температуру испарения не более 1500 – 1600 °С и не диссоциируют (или разлагаются) при испарении. Можно получать проводящие и резистивные пленки на основе металлов (алюминий Al, хром Cr), сплавов (нихром, РС, МЛТ), керметов. Однако следует помнить, что свойства пленки сильно зависят от конкретных режимов напыления.

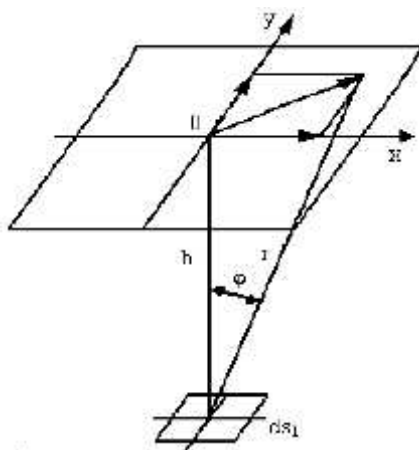


Рис. 3.2 – Испарение с малой площадки  $ds_1$  на параллельную ей плоскую поверхность

Одним из важнейших параметров проводящих и резистивных пленок является удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{d},$$

где  $\rho_v$  - удельное объемное сопротивление пленки,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;

$d$  - толщина пленки, м.

При осаждении пленок стремятся обеспечить требуемое значение  $\rho_s$  с заданным разбросом этой величины по подложке. Воспроизводимость  $\rho_s$  будет зависеть от воспроизводимости свойств пленок и их толщины. Удельное объемное сопротивление пленок  $\rho_v$  для данного материала будет определяться структурой и составом пленок. Факторами, влияющие на эти параметры,



является скорость конденсации, т.е. плотность потока паров вещества на подложку, температура подложки, давление остаточных газов и др. Например, минимальное удельное сопротивление пленок хрома получается при температуре подложки 200-300 °С при толщине пленок 100-200 нм. Этот минимум соответствует максимальному размеру зерен около 20-25 нм. Большое сопротивление при малых скоростях напыления и низких температурах подложки связано, по-видимому, с адсорбцией газовых примесей из вакуумного объема и образованием химических соединений, например, окислов хрома. Увеличение сопротивления при очень больших скоростях осаждения и высокой температуре подложки коррелирует с имеющим место при этих условиях изменением структуры пленок.

### *3.5. Методика измерения толщины пленок с помощью микроинтерферометра МИИ-4М*

Толщина и показатель преломления пленок могут быть измерены с помощью интерференционного микроскопа. Одно из основных условий наблюдения интерференции света – когерентность интерферирующих волн, то есть постоянство во времени их разности фаз. Получение когерентных световых волн во всех интерференционных схемах достигается путем искусственного разделения первичного светового пучка от одного источника на две части. В результате в области перекрытия полученных световых пучков возникает устойчивая интерференционная картина – система чередующихся светлых и темных полос. В точках, где разность фаз(хода) равна целому числу длин волн  $\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$ ,..., получают светлые полосы, а где разность равна  $1/2\lambda$ ,  $3/2\lambda$ ,  $5/2\lambda$ ,... – темные полосы. Если на испытуемой поверхности имеется впадина или бугор, то в этом месте разность хода световых волн изменяется и, следовательно, интерференционные полосы смещаются.

В данной работе измерение толщины и показателя преломления пленок производится на микроскопе МИИ-4М. В поле зрения МИИ-4М видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционная картина. В местах выступов или впадин интерференционная картина искривляется. Величина искривления полос дает возможность измерить высоту неровности.

Для измерения толщины непрозрачной пленки, образец устанавливается на предметный столик, который может перемещаться по двум осям. Кроме того, столик может перемещаться как в вертикальной плоскости, так и вокруг оси. Под углом к вертикальной оси расположен тубус с винтовым окулярным микрометром.

После настройки четкого изображения объекта в поле зрения становятся видны интерференционные полосы (рисунок 3.9 а).

Измерение толщины пленки при работе с белым светом производится по двум черным полосам. Величина интервала между полосами выражается числом делений барабана окулярного микрометра. Для большей точности измерений наводку нити лучше всего производить по середине, а не по краю полосы. Толщина пленки рассчитывается по формуле:

$$h = \lambda \frac{d_1}{2d_2},$$

где  $\lambda$  – длина световой волны (для белого света  $0,54 \text{ мкм}$ );  $d_1$  – сдвиг полос;  $d_2$  – расстояние между полосами.

В случае прозрачной пленки происходит одновременно отражение луча и от поверхности подложки (луч А) и от поверхности пленки (луч Б). Эти оба луча дают свою серию интерференционных полос. Луч А имеет оптическую длину пути по сравнению с лучом Б в  $2n$  раз больше ( $n$  – показатель преломления пленки), поскольку луч А проходит пленку дважды. В результате в поле зрения видны две, а при наличии ступеньки три серии интерференционных полос (рисунок 3.3 б). Серия полос отраженных от подложки, менее яркая, так как часть света поглощается в пленке.

В этом случае толщина пленки равна:

$$h = \lambda \frac{d_1}{2d_2 n}.$$

Следовательно

$$n = \frac{d_3}{d_1}.$$

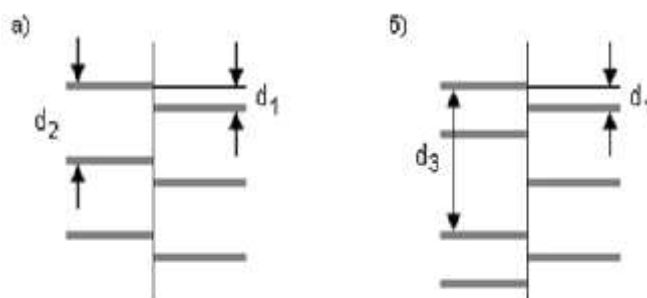


Рис.3.3. Интерференционные полосы:  
а) непрозрачная пленка; б) прозрачная пленка

Измерения проводятся интерференционным методом с использованием интерферометра Линника типа МИИ-4М.

#### *Измерение шероховатости пластин*

При правильной настройке микроинтерферометра в его поле зрения должны быть видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы, изогнутые в местах, где проходят канавки или царапины, причем интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно к направлению царапин. При измерении глубины царапины или риски на глаз следует определить, на какую долю интервала между полосами или на сколько интервалов изгибается полоса в месте прохождения царапины.

При работе с белым светом глубина царапины или риски  $H$ , мкм, определяется по формуле:

$$H = 0,27\Delta N.$$

При работе с монохроматическим светом:

$$H = 0,5\lambda\Delta N,$$

где  $\Delta N$  – величина изгиба полосы в долях интервала;  $\lambda$  – длина волны светофильтра.

Для измерения с помощью винтового окулярного микрометра МОВ-1-16<sup>x</sup> его следует повернуть так, чтобы одна из нитей перекрестия совпадала с направлением интерференционных полос, а другая с направлением царапин на исследуемой поверхности. После этого закрепить микрометр зажимным винтом.

Для определения величины неровности необходимо измерить величину интервала между полосами, величину изгиба полос и вычислить высоту неровности.

Порядок проведения работы описан в документации по эксплуатации интерферометра МИИ-4М.

## 4. ИОННО-ПЛАЗМЕННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСЛОЕВ

### 4.1. Цель работы

4.1.1. Приобрести практические навыки осаждения нанослоев методом ионно-плазменного распыления.

4.1.2. Освоить методику измерения толщины пленок с помощью микроинтерферометра МИИ-4М.

### 4.2. Краткие теоретические сведения

Ионно-плазменное распыление – это процесс распыления мишени, выполненной из требуемого материала, высокоэнергетическими ионами инертных газов. Распыленные ионами атомы материала мишени, осаждаясь на подложке, формируют пленку материала. Ионно-плазменное распыление можно реализовать путем распыления материала катода в плазме газового разряда ионизированными молекулами разряженного газа (катодное распыление) либо путем распыления мишени в высоком вакууме сформированным пучком ионов (ионное распыление).

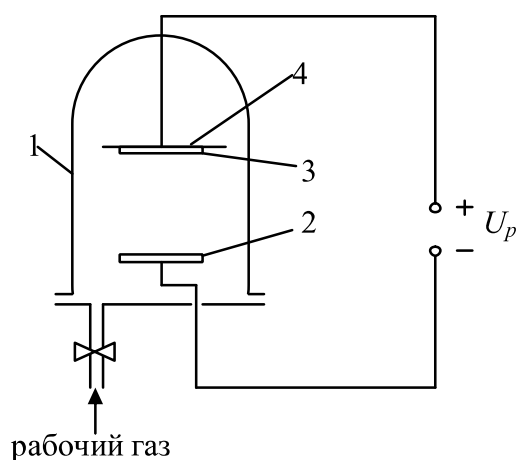


Рис. 4.1. – Схема ионно-плазменного распыления: 1 – вакуумная камера; 2 – катод; 3 – подложка; 4 – анод.

Распыление ионной бомбардировкой, как и испарение в вакууме, позволяет получать проводящие, резистивные, диэлектрические, полупроводниковые и магнитные пленки, но, по сравнению с термическим вакуумным напылением, имеет ряд преимуществ.

Катодное распыление основано на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными молекулами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его разрушении, распространяются в окружающем пространстве и осаждаются на приемной поверхности, которой является подложка. Схема процесса катодного распыления изображена на рис.4.1. В рабочей камере 1 установлена двухэлектродная система, состоящая из «холодного» катода 2, изготовленного из материала, подвергаемого распылению, и анода 4, на котором располагается подложка 3. Из рабочей камеры откачивается воздух, после чего в камеру напускается рабочий газ, давление которого устанавливается равным ( $1 \div 10^{-1}$ ) Па.

Затем между катодом и анодом подается высокое напряжение, порядка нескольких сотен вольт, которое приводит к ионизации рабочего газа и появлению плазмы.

Получение чистых пленок полупроводников, металлов, сплавов и соединений реализуется путем распыления соответствующих мишеней в инертном газе, чаще всего в аргоне. Для реализации ионного распыления вакуумная установка предварительно откачивается до высокого вакуума ( $10^{-2}—10^{-1}$ ) Па, затем напускается аргон до рабочего давления, при котором можно зажечь разряд. В диодных системах распыления (см. рис. 4.1) разряд поддерживается при требуемых параметрах разряда  $U_p$  и токе разряда. Ионы аргона, ускоренные катодным падением потенциала, близким к  $U_p$ , бомбардируют поверхность катода. Катод выполняется из распыляемого материала или изготавливается специальная мишень. Энергию ионов можно приблизительно считать равной  $U_p$ . Разрядный ток определяет количество ионов, падающих на мишень, а следовательно, и скорость распыления. Ионное распыление рекомендуется для получения пленок тугоплавких металлов вольфрама, молибдена, тантала, рения, циркония и др. Этот метод широко используется для получения пленок алюминия с добавкой кремния для металлизации в технологии полупроводниковых интегральных схем.

Для осаждения пленок сплавов метод ионного распыления имеет ряд преимуществ перед методом термического испарения. Химический состав напыленных пленок обычно соответствует составу катода-мишени даже в том случае, если компоненты сплава характеризуются различными коэффициентами распыления. Это объясняется тем, что спустя некоторое время после того, как компонент с наибольшей скоростью распыления покинет катод, поверхность катода обогащается другим компонентом до тех пор, пока не установится «стационарный» состав поверхности. По достижении этого состояния напыленная пленка будет иметь тот же состав, что и катод. Иначе обстоит дело при испарении: из-за высокой температуры испарения вещество из внутренних участков быстро диффундирует к поверхности. Если бы при распылении температура катода повысилась настолько, что диффузия из

объема стала бы значительной, то напыленные пленки по составу отличались бы от катода.

При распылении сложных соединений не происходит диссоциации, что позволяет получать пленки стехиометрического состава. Этим способом получены пленки таких составов, как InSb, GeSb,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , PbTe и др. с хорошей стехиометрией.

Ионно-плазменное распыление характеризуется коэффициентом распыления  $S$ :

$$S = \frac{N_a}{N_u},$$

где  $N_a$  - число выбитых атомов;

$N_u$  - число падающих ионов.

Коэффициент распыления является функцией энергии ионов, его массы, свойств материала мишени и др.

Скорость распыления определяется  $S$ , количеством бомбардирующих ионов  $N_u$  и плотностью материала мишени  $N_0$ :

$$V_p = \frac{N_u \cdot S}{N_0};$$

Величина  $N_u$  зависит от плотности ионного тока  $j$  на мишени:

$$N_u = \frac{j}{n \cdot e},$$

где  $j$  – плотность ионного тока,  $\text{A}/\text{м}^2$ ;

$n$  – кратность заряда иона;

$e$  – заряд электрона, Кл.

Скорость осаждения пленок на подложке определяется скоростью распыления, расстоянием от мишени до подложки, конфигурацией электродов.

С другой стороны, скорости осаждения  $V_{oc}$  – это:

$$V_{oc} = \frac{d}{t}, \quad [\text{м}/\text{с}],$$

где  $d$  – толщина пленки;

$t$  – время напыления.

Время напыления пленок будет определяться параметрами, от которых зависит скорость осаждения, а именно коэффициентом распыления, плотностью ионного тока и геометрическими размерами. Коэффициент распыления для данной комбинации ион – мишень является однозначной функцией энергии ионов, т.е. для ионно-плазменного распыления напряжения разряда  $U_p$ . Плотность ионного тока зависит от разрядного тока  $I_p$ .

Управлять временами напыления пленок можно с помощью напряжения и тока разряда при неизменных геометрических параметрах.

Распыление с разделением камеры формирования разряда и камеры осаждения пленок служит для получения чистых пленок для нужд микроэлектроники.

#### *4.3. Методика напыления пленок методом ионно-плазменного распыления*

Методика ионно-плазменного распыления:

1. Включить охлаждения магнетрона. Переключить переключатель в положение «ХОЛ. ВОДА» на панели управления.
2. Включить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» на панели управления.
3. Включить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания.
4. Подать напряжение на магнетрон 500 В.
5. Вращением вентиля подачи рабочего газа установить давление в рабочей камере  $(4 - 8) \cdot 10^{-1}$  Па. Вентиль вращать очень медленно с кратковременными перерывами 15-20 с. Род рабочего газа зависит от напыляемого материала. При напылении металлов используют инертные газы (Ar, He, H<sub>2</sub>). При напылении диэлектриков используют кислород или азот (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>).
6. Произвести «тренировку» мишени. Тренировка заключается в распылении материала мишени в течение 3-5 минут при отведенной подложке. При тренировке разрушается окисел на поверхности распыляемой мишени. Иногда, при тренировке используют кратковременное повышение тока до предельных значений для разрушения прочных окислов (оксид алюминия).
7. Установить рабочий ток магнетрона.
8. Установить подложку в рабочее положение и осуществить напыление в течении требуемого времени. Затем отвести подложку в сторону.
9. Уменьшить напряжение на блоке питания до минимума. Отключить тумблер «СЕТЬ» на блоке питания, отключить тумблер «ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ» на панели управления.
10. Закрыть вентиль подачи рабочего газа.
11. Через 2-3 минуты отключить охлаждение магнетрона. Переключить тумблер «ХОЛ. ВОДА» в среднее (исходное) положение.
12. После любого напыления, производимого в рабочей камере, развакуумировать установку можно только через 5-10 минут. Это время требуется для откачки насосом паров распыленных материалов.

#### *Развакуумирование рабочего объема и извлечение образцов*

1. Закрыть затвор б.
2. Открыть натекагель 9 для напуска воздуха в рабочий объем.
3. Поднять колпак 10 до упора и повернуть его по часовой стрелке на угол 30 - 90°.
4. Извлечь образцы.
5. Опустить колпак.

#### *Отключение вакуумной установки*

1. Откачать рабочий объем.
2. Закрыть затвор б.

3. Отключить тумблер «Диффузионный насос». Время остывания диффузионного насоса составляет 30-40 минут.
4. Через 30-40 минут после отключения диффузионного насоса, закрыть вентиль основной линии откачки 3.
5. Отключить тумблер «Механический насос».
6. Напустить воздух в механический насос, открыв клапан 11.
7. Отключить водяное охлаждение диффузионного насоса.
8. Отключить тумблер «СЕТЬ» на панели управления.
9. Отключить центральный рубильник.

#### 4.4. Измерение удельного поверхностного сопротивления

Для измерения удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$  широкое распространение получил четырехзондовый способ. Размещение зондов показано на рис. 4.2.

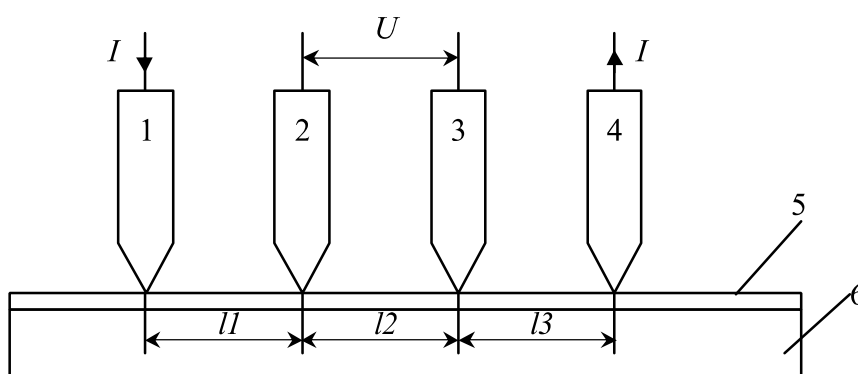


Рис. 4.2 – Зондовый метод определения удельного сопротивления:  
1–4 – зонды; 5 – пленка; 6 – подложка.

При размещении зондов в линию на материале полубесконечного объема при  $l_1=l_2=l_3=l$  объемное удельное сопротивление  $\rho_v$  выражается равенством:

$$\rho_v = U \frac{2\pi \cdot l}{I} \quad (1.1)$$

Если материал, на который устанавливается зонд, представляет собой бесконечно тонкую пластину, укрепленную на изолирующей подложке то уравнение примет следующий вид:

$$\rho_v = \frac{U \cdot d \cdot \pi}{\ln 2 \cdot I} \quad (1.2)$$

или

$$\rho_s = \frac{\rho_v}{d} = 4,532 \frac{U}{I}, \quad (1.3)$$

где  $d$  – толщина пленки.

Отсюда можно рассчитать удельное объемное сопротивление  $\rho_v$  при измеренной толщине пленки  $d$ .

*Задание на работу*

1. Составить технологический маршрут в соответствии с заданным напыляемым материалом.

2. Произвести напыление резистивных и проводящих пленок.
3. Измерить толщину полученных пленок (методика изложена в лабораторной работе №3).
4. Измерить удельное поверхностное сопротивление.
5. Определить толщину напыленных пленок  $d$  и рассчитать объемное удельное сопротивление  $\rho_v$

*Литература:*

1. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. — Томск: 2007. — 151 с.
2. Технология тонких пленок. Т.1/ Под ред. Майссела, Р. Глэнга; Пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. —М.: Сов радио, 1977. -664 с.
3. Данилина Т.И. Вакумно-плазменные методы получения наноструктур: Учебное пособие.-Томск: ТУСУР, 2012.- 89 с.