

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

Кафедра электронных приборов

Основы технологии оптических материалов и изделий

**ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА
НАНЕСЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ И РЕЗИСТИВНЫХ
ПОКРЫТИЙ**

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика»

Орликов, Леонид Николаевич.

Изучение вакуумметрического метода нанесения проводящих и резистивных покрытий = Основы технологии оптических материалов и изделий: методические указания к лабораторной работе для студентов направления «Фотоника и оптоинформатика» / Л. Н. Орликов; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск : ТУСУР, 2012. - 22 с.

Целью настоящей работы является изучение процесса газовой выделения, определение количества выделившегося газа и скорости газовой выделения при прогреве образца в вакууме, изучение скорости газовой выделения в зависимости от режимов обезгаживания, выяснение механизма газовой выделения.

В ходе выполнения работы у студентов формируются:

- способность выполнять задания в области сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов;
- способность разрабатывать инструкции по эксплуатации используемых технического оборудования и программного обеспечения для обслуживающего персонала.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсам «Основы технологии оптических материалов и изделий».

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2012 г.

Основы технологии оптических материалов и изделий

ИЗУЧЕНИЕ ВАКУУММЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ ПРОВОДЯЩИХ И РЕЗИСТИВНЫХ ПОКРЫТИЙ

Методические указания к лабораторной работе
для студентов направления « Фотоника и оптоинформатика»

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____ Л.Н.Орликов
« ____ » _____ 2012 г

Содержание

1 Введение	5
2. Теоретическая часть	5
2.1 Методы получения тонких пленок	5
2.2 Нанесение тонких пленок путем термического испарения в вакууме	6
2.2.1 Этапы процесса нанесения пленок	6
2.2.2 Испарение вещества в вакууме	6
2.2.3 Взаимодействие потока испаренных атомов в пролетном пространстве	7
2.2.4 Конденсация атомов на подложке	8
2.3 Распределение испаряемого вещества по плоской подложке	9
2.3.1 Факторы и условия, определяющие толщину пленки	9
2.3.2 Расчет толщины наносимой пленки в случае точечного испарителя	9
2.3.3 Расчет толщины наносимой пленки в случае поверхностного испарителя	11
2.4 Измерение толщин тонких пленок	11
2.5 Контрольные вопросы	14
3 Экспериментальная часть	14
3.1 Оборудование	14
3.2 Задание	15
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания	16
3.4 Содержание отчета	18
Список литературы	18
Приложение Методика работы с вакуумметром ВИТ-2	20

1 Введение

В настоящее время металлопленочные элементы используются во многих электровакуумных и полупроводниковых приборах, интегральных схемах, в точных измерителях мощности, вентилях и фильтрах сверхвысоких частот.

На основе пленочной технологии изготавливаются термопары, тензометры, пленочные терморезисторы и многие другие приборы электронной техники. Тонкие пленки находят широкое применение в металлографических исследованиях, при нанесении оптических покрытий. В электровакуумном производстве широко применяются тонкие пленки при изготовлении приемных и передающих электроннолучевых приборов, фотоэлектронных умножителей, электронно-оптических преобразователей, приборов СВЧ. Они выполняют функции подложек фотокатодов, защитных и отражающих поверхностей, проводящих и резистивных покрытий, электростатических экранов и т.д.

Целью настоящей работы является изучение особенностей метода вакуум-термического нанесения пленочных покрытий, ознакомление с оборудованием для нанесения тонких металлических пленок и освоение методов измерения толщины наносимой пленки.

2. Теоретическая часть

2.1 Методы получения тонких пленок

Существует ряд методов получения тонких пленок, которые применяются в различных областях современной техники:

- 1) испарение в вакууме;
- 2) катодное распыление;
- 3) химическое осаждение;
- 4) термохимическое осаждение;
- 5) осаждение из газовой фазы;
- 6) лазерное осаждение и ряд других.

Выбор того или иного метода зависит от назначения пленки. В настоящее время широкоприменяемым технологическим методом получения тонких пленок в производстве приборов электронной техники является напыление в вакууме.

Преимущества этого метода с точки зрения изготовления тонких пленок заключается в следующем:

- 1) на одной и той же установке можно получить однородные слои металлов и сплавов различной толщины и конфигурации;
- 2) можно напылять слои как на внутреннюю, так и на внешнюю поверхность изделия;

3) возможно получение тонких пленок с чередованием различных металлов, диэлектриков и полупроводников, а также из разнородных веществ с заданным соотношением составных частей и даже с различной толщиной каждого слоя;

4) тонкие слои получаются при использовании малых количеств вещества, что особенно важно в случае применения редких или драгоценных металлов и веществ.

2.2 Нанесение тонких пленок путем термического испарения в вакууме

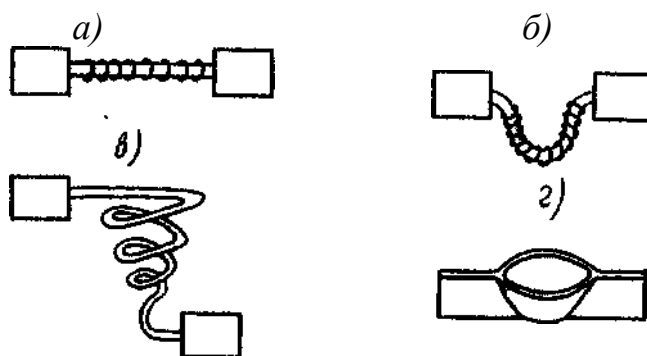
2.2.1 Этапы процесса нанесения пленок

Процесс нанесения на различные подложки тонких пленок веществ путем термического испарения в вакууме может быть разделен на три этапа:

- 1) испарение вещества в вакууме;
- 2) взаимодействие потока испаренных атомов в пролетном пространстве;
- 3) конденсация атомов на подложке.

2.2.2 Испарение вещества в вакууме

Испарение металлов и неметаллов производится путем нагрева испаряемого вещества в вакууме. Для этой цели служат различного вида испарители, некоторые из которых представлены на рис.2.1.



- а) линейный испаритель;
- б) U -образный испаритель;
- в) спиральный конический испаритель;
- г) лодочка (для несмачивающих материалов).

Рисунок 2.1 - Испаритель с косвенным подогревом

При нагреве вещества кинетическая энергия молекул и атомов в поверхностном слое увеличивается, они отрываются от поверхности и распространяются в свободном пространстве. С повышением температуры

и увеличением энергии молекул возрастает количество частиц способных оторваться от поверхности испаряемого вещества. Обычно при нагревании вещество сначала плавится, а затем испаряется с заметной скоростью. Некоторые вещества (магний, кадмий, цинк, хром) переходят в парообразное состояние, минуя жидкую фазу (сублимируют).

Испаряемые частицы обычно представляют собой атомы вещества. Исключение составляют элементы У и У1-а подгрупп, которые испаряются в виде молекул. Поэтому поток пара вещества называют атомарным или молекулярным.

Из условия равновесия пар-твердое тело, пар-жидкость путем решения уравнений термодинамики получена зависимость давления насыщенного пара от температуры

$$\lg P_s = A - \frac{B}{T},$$

где P_s - давление насыщенного пара, Па;

A и B - постоянные, характеризующие вещество;

T - температура испаряемого вещества, К.

Значения A и B для ряда веществ приведены в [1].

Температура вещества, при которой давление насыщенного пара P_s равно 1,33 Па (10^{-2} торр), называют условной температурой испарения.

При P_s меньших 10^{-2} Па и давлении остаточного газа в технологической камере не более 10^{-2} Па скорость испарения, т.е. количество вещества, покидающее единицу поверхности испарителя в единицу времени, определяется:

$$W = P_s \sqrt{\frac{m}{2\pi k T}},$$

где W - скорость испарения, кг / ($\text{м}^2 \cdot \text{с}$);

m - масса молекулы, кг;

k - постоянная Больцмана;

T - температура испарения, К.

2.2.3 Взаимодействие потока испаренных атомов в пролетном пространстве

В пролетном пространстве должны быть созданы условия для образования атомарного потока. Тогда траектории атомов будут прямолинейны, рассеяния не будет, тень за маской на подложке будет четкой и для атомарного потока станут справедливы законы геометрической оптики Ламберта. Эти условия будут выполняться, если длина свободного пробега молекул газа в технологической камере будет превышать расстояние между испарителем и подложкой. Если принять расстояние между испарителем и подложкой 10-20 см, то рабочее давление газа в камере распыления должно быть ниже 10^{-2} Па.

2.2.4 Конденсация атомов на подложке

Конденсацией называется процесс перехода вещества из газообразной фазы в твердую или жидкую.

Если на пути движения атомарного потока испаряемого вещества поместить подложку, то на ее поверхности образуется пленка конденсированного вещества. Однако не все, ударившиеся о подложку атомы остаются на ней, происходит частичное отражение испаряемых атомов от поверхности подложки.

Конденсация атомного пучка на поверхности существенно зависит от температуры поверхности. Существует некая критическая температура, выше которой атомы испаренного вещества полностью отражаются от подложки. Критическая температура зависит от природы конденсируемого вещества, от природы подложки, степени ее чистоты, а также плотности падающего атомного пучка.

Критическая температура возрастает с увеличением интенсивности падающего пучка и при большой плотности пара возможно образование тонкой пленки при температурах значительно более высоких, чем при малой плотности пара.

Кроме понятия критической температуры при данной плотности атомного пучка вводится понятие критической плотности. Критической плотностью атомного пучка при фиксированной температуре подложки называется такая плотность этого пучка, ниже которой конденсированная пленка не может быть образована.

По теории Френкеля конденсация происходит следующим образом: атомы пучка, ударяясь о поверхность подложки, остаются на ней в течение некоторого отрезка времени, двигаясь по этой поверхности подобно двумерному газу (так называемая миграция или подвижность атомов), а затем могут вновь испаряться с поверхности подложки. При своем движении по поверхности адсорбированные атомы встречаются с другими адсорбированными атомами и образуют с ними центры большой стабильности - преимущественно группы из двух атомов или дублеты. Дублеты имеют значительно большую среднюю продолжительность жизни на поверхности подложки, чем отдельные атомы, поэтому они играют роль центров конденсации.

Чем выше температура подложки и чем ниже температура кипения данного вещества, тем вероятнее вторичное испарение атомов с поверхности подложки. При большой плотности пара испаряющиеся с подложки атомы захватываются вновь образующимися частицами и, осаждаваясь на подложке, совместно образуют ядра конденсации и прочно удерживают все атомы, прибывающие позже.

Структура и свойства тонких пленок, полученных путем термического испарения в вакууме, в значительной мере определяются условиями конденсации и зависят от природы испаряемого вещества, соответствия его структуры и структуры подложки, природы подложки,

степени ее очистки, микрорельефа и температуры поверхности, степени вакуума и состава остаточной среды в процессе испарения вещества и его конденсации, скорости испарения вещества, угла падения атомарного потока на подложку, толщины пленки. Адгезия (прилипание) пленки к подложке во многом определяется степенью очистки последней. При очистке поверхности подложки должны быть удалены жиры, адсорбированная влага и другие загрязнения, препятствующие образованию прочного сплошного слоя.

2.3 Распределение испаряемого вещества по плоской подложке

2.3.1 Факторы и условия, определяющие толщину пленки

Распределение испаряемого вещества по плоской поверхности подложки зависит от формы испарителя и взаимного расположения его относительно подложки. В зависимости от формы испарителя испарение может происходить равномерно во всех направлениях (точечные испарители) или в каком-либо предпочтительном направлении (плоскостные, тигельные испарители). При расчете распределения испаряемого вещества по приемной поверхности делаются следующие допущения:

1) испарение производится при достаточно высоком вакууме, так что количество столкновений испаряемых частиц с молекулами газа пренебрежимо мало и поток испаряемых частиц можно считать атомарным;

2) интенсивность пара мала, что влиянием столкновений между атомами испаряемого вещества можно пренебречь;

3) каждый атом испаряемого вещества конденсируется на подложке при первом ударе.

2.3.2 Расчет толщины наносимой пленки в случае точечного испарителя

Количество вещества, достигающее поверхности подложки, будет зависеть от типа испарителя и расположения подложки относительно испарителя. За точечный испаритель можно принимать малую сферу dS_1 , испаряющую вещество с одинаковой скоростью в количестве M во всех, направлениях. Для молекулярного потока испарение вещества из точечного источника в телесный угол $d\omega$ в направлении r , аналогично распространению лучистой энергии и описывается известными оптическими соотношениями. Поток испаренного вещества, приходящийся на единицу телесного угла, есть

$$dM = \frac{M}{4\pi}, \quad (2.1)$$

где M - общее количество вещества, испаренного с испарителя dS_1 за время t , кг.

В пределах пространственного угла $d\omega$ на площадку dS_2 подложки поступает

$$dM = \frac{M}{4\pi} d\omega, \quad (2.2)$$

Через любое сечение конуса, ограниченного $d\omega$, проходит один и тот же поток. Сечение конуса сферической поверхностью с центром в dS_1 и радиусом, равным единице, дает меру телесного угла конуса $d\omega$. Если нормаль к dS_2 составляет угол φ с осью конуса, а расстояние от dS_1 до площадки dS_2 есть r , то

$$d\omega = \frac{dS_2 \cdot \cos \varphi}{r^2}. \quad (2.3)$$

Количество вещества, поступающего на единицу поверхности подложки, с учетом выражения (2.2) и (2.3) есть

$$dM = \frac{M}{4\pi} \cdot \frac{\cos \varphi}{r^2} \quad (2.4)$$

т.е. это количество обратно пропорционально квадрату расстояния от испарителя до приемной поверхности (подложки) и прямопропорционально косинусу угла, составляемого направлением потока с нормалью к подложке.

Толщину пленки можно определить через плотность и объем конденсата на подложке

$$dM = \rho \cdot dV = \rho \cdot dS_2 \cdot d, \quad (2.5)$$

где ρ - плотность конденсата;

V - объем конденсата;

d - толщина пленки на подложке.

С учетом выражения (2.5) и (2.4) получаем выражение для толщины пленки

$$d = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{\cos \varphi}{r^2}, \quad (2.6)$$

Если подложка представляет собой плоскую поверхность, расположенную на расстоянии h от испарителя, то толщина пленки на подложке в любой точке A с координатами X , Y может быть определена по выражению:

$$d(x, y) = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{h}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}}. \quad (2.7)$$

Толщина пленки над испарителем (точка 0 при $X=0$, $Y=0$)

$$d_0 = \frac{M}{4\pi\rho} \cdot \frac{1}{h^2}. \quad (2.8)$$

Отношение толщин в точках A и O будет:

$$\frac{d(x, y)}{d_o} = \frac{h^3}{(h^2 + x^2 + y^2)^{3/2}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^{3/2}}. \quad (2.9)$$

2.3.3 Расчет толщины наносимой пленки в случае поверхностного испарителя

Для поверхностного испарителя количество испаряемого вещества зависит от направления испарения. В соответствии с законом косинуса Ламберта-Кнудсена количество вещества, проходящего в телесном угле $d\omega$ по направлению r , образующему угол θ с нормалью к поверхности испарителя, равно

$$dM = \frac{M}{\pi} \cdot \cos\theta \cdot d\omega. \quad (2.10)$$

Используя формулы (2.5 - 2.9) и учитывая формулу (2.10) можно получить выражение для толщины пленки, конденсированной в любой точке A подложки, находящейся параллельно плоскости испарителя

$$d(x, y) = \frac{M}{\pi\rho} \cdot \frac{h^2}{(h^2 + x^2 + y^2)^2}. \quad (2.11)$$

Соответственно отношение толщин пленки в точках A и O будет

$$\frac{d(x, y)}{d_o} = \frac{h^4}{(h^2 + x^2 + y^2)^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{h^2} + \frac{y^2}{h^2}\right)^2}. \quad (2.12)$$

Выражения (2.9) и (2.12) используются для оценки равномерности толщины пленки на подложке при использовании соответствующих испарителей.

2.4 Измерение толщин тонких пленок

Толщина тонких пленок является одним из важных параметров, определяющих ее свойства. Однако, вследствие неопределенности структуры, зависящей от условий нанесения и отличия параметров тонких пленок от параметров соответствующих массивных материалов, измерение толщин тонких пленок представляет определенную трудность.

В настоящее время разработано большое количество разнообразных методов определения толщины пленки:

- 1) путем взвешивания;
- 2) химические и электрические (измерения электрического сопротивления или емкости пленки);
- 3) оптические методы (по измерениям интенсивности света, его поляризации, интерференционные методы и др.).

Однако существующие методы определяют не истинную, а некоторую «условную» толщину пленки, которая определяется различным образом в зависимости от исходных параметров, положенных в основу этого определения.

При определении толщины пленки путем взвешивания принимают, что плотность пленки равна плотности массивного материала. При этом под условной толщиной пленки понимают ту толщину, которую имел бы слой, если бы образующий его материал был равномерно распределен по поверхности подложки с плотностью, равной плотности массивного металла.

При определении толщины пленки электрическим способом, путем измерения сопротивления нанесенной пленки, принимают, что удельное сопротивление пленки равно удельному сопротивлению массивного металла.

Оптические методы определения толщины пленки, основанные на измерении таких параметров как коэффициенты отражения и прозрачности, фазовые сдвиги, вносимые присутствием пленки, угловая зависимость этих сдвигов и т.п., исходя из выбранных параметров определяют условную толщину пленки.

Следует заметить, что значения условных толщин тонкой пленки, полученных различными методами, не соответствуют друг другу. При выборе того или иного метода определения эффективной толщины в качестве основного следует ориентироваться на требования, связанные с дальнейшим использованием тонких пленок.

Толщина тонкой пленки может быть измерена после извлечения подложки из технологической камеры или непосредственно в процессе ее нанесения.

В первом случае нельзя управлять процессом нанесения пленки, можно только судить о правильности выбранных режимов испарения.

Во втором случае контролируется сам процесс нанесения пленки, который может быть остановлен по достижении требуемой толщины.

В работе используются электрический (резистивный) и оптический методы измерения толщины пленки. Резистивный метод позволяет контролировать рост пленки в процессе нанесения по величине ее электрического сопротивления. В основу оптического метода измерения толщины нанесенной пленки положена зависимость коэффициента пропускания света от толщины пленки.

Согласно закону Бугера-Ламберта

$$I\lambda = I_0\lambda \cdot e^{-\kappa^1 d}, \quad (2.13)$$

где $I_0\lambda$ и $I\lambda$ - интенсивности монохроматического излучения до и после прохождения через испытуемое вещество (пленку);

κ - коэффициент поглощения излучения, зависящий от природы вещества пленки и от длины волны падающих лучей, см^{-1} ;

d - толщина пленки, см.

Значения κ^l для ряда металлов приведены в табл.2.1. Эти значения получены для излучения с длиной волны 589 нм.

Таблица 2.1 - Коэффициент поглощения излучения

Наименование параметра	Материал пленки					
	Алюмин	Медь	Никель	Сереб	Золо	Стекло
Коэффициент поглощения излучения, см ⁻¹	1·10 ⁶	5,59·10 ⁵	7,8·10 ⁵	8·10 ⁵	6·10 ⁵	7,23·10 ⁻¹

При использовании формулы (2.13) необходимо учитывать то обстоятельство, что полученная пленка обладает значительным коэффициентом отражения. В этом случае значение $I_{0\lambda}$ может быть определено как разница между интенсивностями падающего и отраженного света и формула (2.13) примет вид:

$$I\lambda = (I_{nad} - I_{otr})e^{-\kappa^l d}, \quad (2.14)$$

где I_{nad} – интенсивность падающего света;

I_{otr} – интенсивность отраженного света.

Для измерения световых потоков используется установка, структурная схема которой приведена на рис.2.2

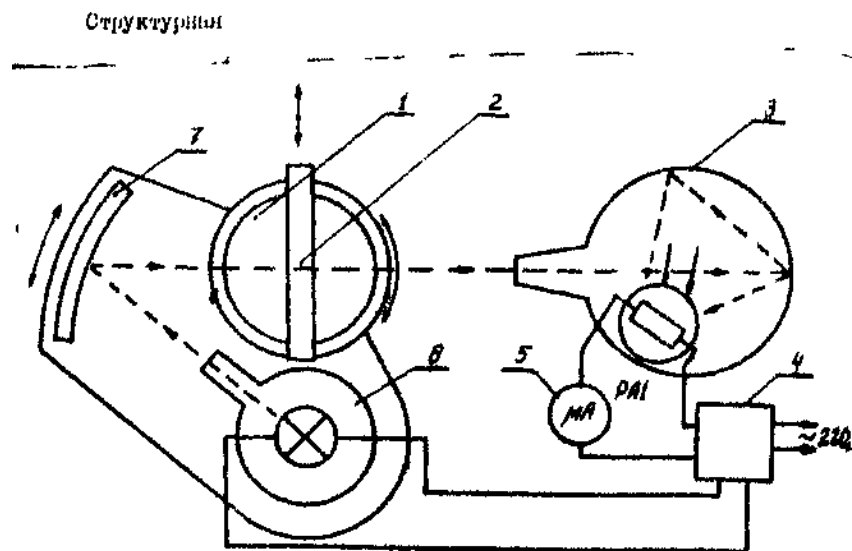


Рисунок 2.2 – Структурная схема установки для измерения световых потоков

Фотосопротивление работает на линейном участке своей световой характеристики и питается от регулируемого стабилизированного источника напряжения 4. Показания прибора 5, измеряющего фототок, пропорциональны интенсивности света, проникающего в фотометрическую головку 3. Фотометрическая головка выношена так, что

исключено влияние на измерения внешнего рассеянного света. При измерении потока отраженного света угол падения устанавливается равный 20° .

2.5 Контрольные вопросы

- 1 Какие типы пленок реализуются на установках типа УВН-2М.
- 2 Какие требования предъявляются к испарителям.
- 3 Какая температура принята за температуру испарения?
- 4 Как получить пленки равномерной толщины?
- 5 Какой принцип работы аппаратуры для контроля скорости и толщины нанесения пленок.
- 6 Каковы приемы повышения адгезии пленок?
- 7 Зачем необходимы отжиг и вжигание пленок?
- 8 Как измеряется поверхностное сопротивление пленок.
- 9 Каковы методы получения окисных пленок?
- 10 Какие газо-фазные реакции возможны при формировании пленок.

3 Экспериментальная часть

3.1 Оборудование

Лабораторная работа выполняется на установке типа УВН-2М для многослойного термического напыления. Вакуумная схема установки приведена на рис.3.1.

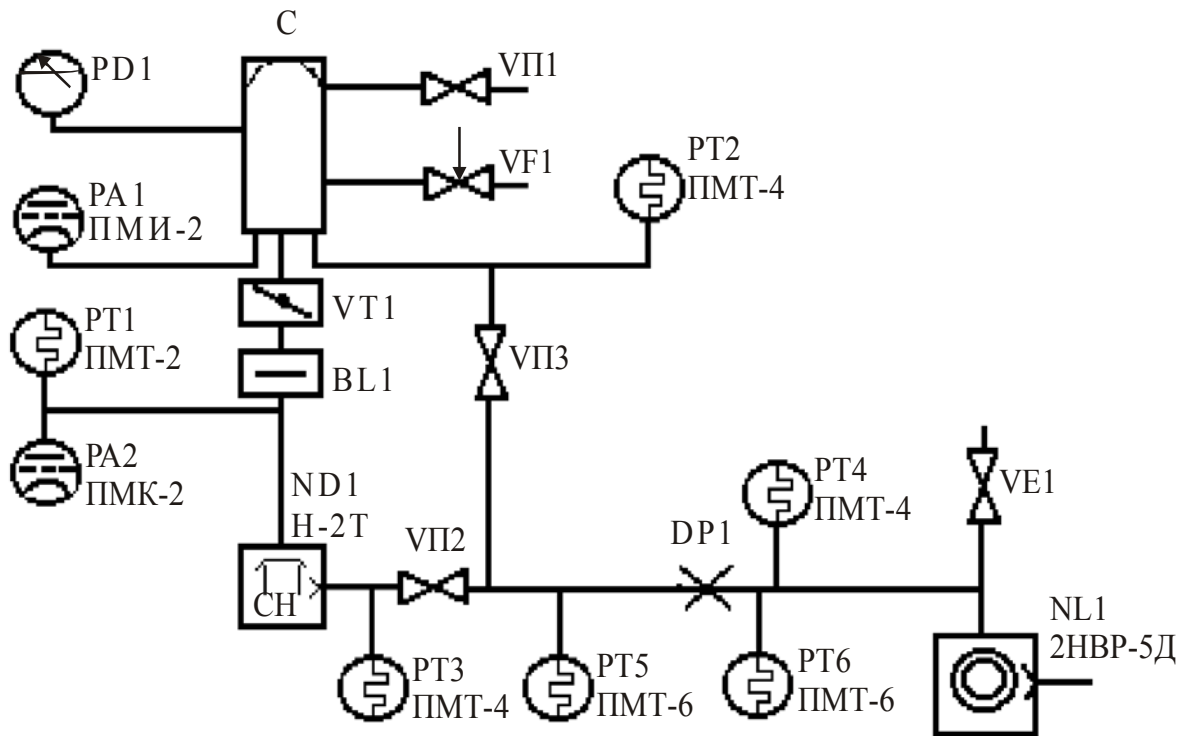


Рисунок 3.1 - Вакуумная схема установки УВН-2М

Вакуумный колпак С объемом 120 л откачивается паромасляным насосом Н-2Т, имеющим эффективную быстроту откачки при давлениях $2,6 \cdot 10^{-2}$ - $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па около $2 \text{ м}^3/\text{с}$. Затвор Ду 280 (*VTI*) и азотная ловушка *BLI* снижают эффективную быстроту откачки рабочей камеры до $0,7$ - $1,0 \text{ м}^3/\text{с}$. Давление, создаваемое в камере при работе насоса Н-2Т, измеряется ионизационным манометрическим преобразователем типа ПМИ-2 (*PAI*). Вращательный насос 2НВР-5Д (*NLI*) имеет быстроту откачки $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ и при помощи клапанов *VP2* и *VP3* может непосредственно подключаться к вакуумному колпаку или создавать предварительное разрежение для пароструйного насоса. Давление при работе вращательного насоса измеряется термопарными манометрическими преобразователями *PT1*, *PT2*, *PT3* и *PT4*.

Атмосферный воздух напускается в камеру через клапан *VPI*, а во вращательный насос – через клапан *VEI* с электромагнитным приводом. В камере предусмотрен дополнительный натекагель *VF1* для напуска газовых смесей.

Манометрические преобразователи *PT5* и *PT6* совместно с диафрагмой *DP1* и электрическим блоком образуют потокомер, позволяющий измерять поток газа, поступающий в вакуумную систему установки.

Подколпачное устройство УВН-2М состоит из шестипозиционной карусели подложек, снабженной неподвижно установленными свободными масками, пяти резистивных испарителей и трех нагревателей подложек. Температура подложек с помощью электронного регулятора может поддерживаться на заданном уровне в пределах от 50 до $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.2 Задание

3.2.1. Исходя из типа предложенного резистивного испарителя и толщины напыляемой пленки, рассчитать навеску испаряемого материала.

3.2.2. Выбрать необходимую температуру подложки.

3.2.3. Рассчитать сопротивление пленки, формируемой с помощью имеющейся свободной маски.

3.2.4. Выбрать температуру испарителя.

3.2.5. Оценить продолжительность напыления при условии полного испарения навески.

3.2.6. Подготовить ответы на контрольные вопросы с ЭВМ.

3.2.7. Подготовить установку к работе, произвести напыление пленки и сравнить расчетные результаты с экспериментально полученными.

3.3 Порядок выполнения работы и методические указания

3.3.1. В исходном состоянии все клапаны установки должны быть закрыты.

3.3.2. Открыть клапан *VIII* НАПУСК ВОЗДУХА В КАМЕРУ. После прекращения поступления воздуха в камеру закрыть клапан *VIII*.

3.3.3. Убедившись, что тумблеры СЕТЬ всех вакуумметров и других электрических блоков находится в положении ВЫКЛЮЧЕНО, а ручки регуляторов в крайнем левом положении, подать электропитание на установку. О подаче напряжения будет указывать сигнальная лампа СЕТЬ.

3.3.4. Поднять колпак. Для этого надавить на кнопку ГИДРОПРИВОД "В" и держать ее в нажатом состоянии до тех пор, пока колпак поднимется на необходимую высоту.

3.3.5. Установить в держатели новый испаритель и поместить на него навеску испаряемого вещества. Пространство вокруг испарителя закрыть стеклянными или металлическими экранами.

3.3.6. Установить на раму подложкодержателя подложку с заранее нанесенными контактными площадками и с помощью временной перемычки проверить наличие электрического контакта с внешней измерительной аппаратурой. Первая пара контактных площадок для широкой полосы подсоединяется ко входу омметра с помощью переключателя СОПРОТИВЛЕНИЕ - СВИДЕТЕЛИ в положении его " I ", а вторая пара контактных площадок для узкой полосы - в положении " У1 ".

3.3.7. Опустить колпак, нажав на кнопку ГИДРОПРИВОД "Н".

3.3.8. Включить механический насос 2 НВР-5ДМ.

3.3.9. Открыть клапан *VII3*. Для этого ручку клапана повернуть против часовой стрелки и вытянуть на себя до отказа. О снижении давления под колпаком судят по показаниям деформационного манометра *PD1*. При достижении давления порядка 100-200 Па включить термopарную часть вакуумметра ВИТ-2, подсоединив к его входу манометрический преобразователь *PT2*. Одновременно может быть включен вакуумметр ВТ-2 для контроля давления непосредственно на входе насоса 2НВР-5ДМ с помощью манометрического преобразователя *PT4*.

3.3.10. При достижении под колпаком давления 6-10 Па клапан *VII3* закрыть и открыть клапан *VII2*. Вакуумметр ВИТ-2 переключить на манометрический преобразователь *PT1*. Когда давление в насосе Н-2Т достигнет значения 6-10 Па, подать в рубашку насоса охлаждающую воду и включить питание нагревателя насоса тумблером ПАРОМАСЛЯНЫЙ НАСОС, предварительно убедившись, что нагреватель одет на насос. Не закрывая клапана *VII2*, открыть клапан *VII3*. Время выхода диффузионного насоса Н-2Т на рабочий режим 30-40 мин.

3.3.11. Когда давление на входе насоса Н-2Т станет меньше $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па закрыть клапан *VII3* и открыть затвор *VI1*. Давление на входе насоса несколько возрастет и после некоторого времени откачки вновь

достигнет значений, меньших $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па. После этого можно переходить на измерение давления с помощью ионизационной части вакуумметра ВИТ-2 и манометрического преобразователя РА1. Порядок работы с вакуумметром изложен в приложениях 1 и 2.

3.3.12. После снижения давления под колпаком до $(5-7) \cdot 10^{-3}$ Па включить нагрев подложки. Для этого необходимо включить регулятор температуры подложки ЭПД-12 и установить с помощью ручки УСТАНОВКА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ необходимую температуру. На пульте управления УВН-2М перевести переключатель АВТОМАТ-РУЧНОЙ в положение АВТОМАТ. Переключатель ИСПАРИТЕЛЬ-НАГРЕВАТЕЛЬ перевести в положение НАГРЕВАТЕЛЬ. Выключатель нагревателя соответствующей подложки. НАГРЕВАТЕЛЬ перевести в верхнее положение. Медленно вращая вправо ручку ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ, установить по амперметру ток нагревателя порядка 20-30 А. Через смотровое окно колпака проверить нагрев подогревателя подложки. Цвет свечения нагревателя должен быть красный, соответствующий температуре 650 - 750 °С. Из-за тепловой инерционности нагревателя рабочий режим его устанавливается в течение 15-30 с. После стабилизации тока нагревателя и при температуре подложки меньше требуемой, перевести переключатель ИСПАРИТЕЛЬ-НАГРЕВАТЕЛЬ в положение ИСПАРИТЕЛЬ. При этом токовый прибор переключается в цепь питания резистивного испарителя.

3.3.13. При достижении температуры подложки заданного значения, перейти к процессу нанесения пленки. Для этого необходимо сначала прогреть в течение 10-15 мин омметр и подготовить его к измерению. Измерение следует начинать с самых больших величин сопротивления, а в ходе формирования и роста пленки своевременно переключать диапазоны измерения. Информация о величине сопротивления пленки может быть выведена на ленту самописца ПС1-02.

Затем подать охлаждающую воду в змеевик колпака, для чего переключатель КОЛПАК перевести в левое положение.

Переключатели ТОК ИСПАРИТЕЛЯ и ВЫБОР ИСПАРИТЕЛЯ перевести в положения, соответствующие номеру испарителя и рабочему току его. Эти параметры указываются преподавателем. Включить тумблер ИСПАРИТЕЛЬ. Заслонка должна при этом находиться в закрытом состоянии. Медленно увеличивая ток испарителя вращением вправо ручки регулятора ТОК ИСПАРИТЕЛЯ и следя через смотровое окно за состоянием нагрева испарителя и навески испаряемого материала, довести температуру испарителя до начала плавления навески. После расплавления навески открыть заслонку и увеличить температуру испарителя до значения, соответствующего температуре испарения материала навески. Контроль температуры испарителя можно вести с помощью термопары, по току испарителя или цвету свечения его.

О полном испарении навески можно судить визуально или по показаниям омметра. После завершения испарения или достижения за-

данного сопротивления пленки закрыть заслонку и выключить питание испарителя и нагревателя подложки. Ручки регуляторов установить в крайние левые положения.

До начала напуска воздуха под колпак температура подложки должна стать менее 50 °С.

3.3.14. После охлаждения подложки выключить ионизационные вакуумметры согласно инструкции по эксплуатации. Особое внимание обратить на порядок выключения вакуумметра ВИТ-2. Затем закрыть клапан *VT1* и выключить нагреватель диффузионного насоса. Для ускорения охлаждения насоса с него снимается нагреватель и включается вентилятор для обдува насоса воздухом. Нагреватель снимается лаборантом, либо преподавателем. Через 20 мин закрыть клапан *VII2*, выключить механический насос и напустить воздух на вход насоса 2НВР-5ДМ посредством клапана *VE1* путем нажатия кнопки НАТЕКАТЕЛЬ

3.3.15. После закрытия клапана *VT1* напустить воздух под колпак, открыв клапан *VIII*, перекрыть воду в системе охлаждения колпака, затем поднять колпак и извлечь подложку.

Снять экраны испарителя и визуально оценить состояние испарителя (полноту испарения навески, степень растекания испаряемого материала по поверхности испарителя, наличие повреждений испарителя).

3.3.16. Пользуясь инструментальным микроскопом, уточнить размеры напыленной пленки. Измерить сопротивление холодной пленки и рассчитать ее толщину.

3.3.17. Оптическим методом определить толщину полученной пленки и сравнить ее значения со значением, найденным резистивным методом, а также со значением, определяемым количеством испаренного материала.

3.4 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) описание цели эксперимента;
- 2) расчетную часть, где представить результаты расчета:
 - навески испаряемого материала, исходя из типа предложенного резистивного испарителя и толщины напыляемой пленки;
 - сопротивления пленки, формируемой с помощью имеющейся свободной маски;
 - продолжительности напыления при условии полного испарения навески.
- 3) алгоритм включения и выключения установки;
- 4) сертификацию соответствия комплектации установки вакуумным оборудованием по сравнению заводского описания и фактической комплектации.

Список литературы

1. Барыбин А.А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А. А. Барыбин - М.: Физматлит, 2006. – 423 с.
2. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро - и нанотехнологий. Томск, 2005, 400 с.
3. Данилина Т.И. Технология СБИС : учебное пособие / Т. И. Данилина, В. А. Кагадей ; Федеральное агентство по образованию, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, - Томск : ТУСУР, 2007. - 287 с.
4. Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств: Справочник. – М.: Радио и связь, 1991. – 525 с. ISBN 5-03-003432-3

Методика работы с вакуумметром ВИТ-2

1.1. Измерение давления в диапазоне $1,33 \cdot 10^1 - 1,33 \cdot 10^{-1}$ Па.

Измерения производятся с преобразователем ПМТ-2 или ПМТ-4 следующим образом:

1) тумблер СЕТЬ 220 В термодпарной части вакуумметра установить по направлению стрелки, при этом должна загораться сигнальная лампа;

2) перевести переключатель ИЗМЕРЕНИЕ - ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ в положение ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ и ручкой ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ установить по нижней шкале левого измерительного прибора необходимый ток накала преобразователя (ток накала нагревателя указан на шильдике преобразователя);

3) установить переключатель ИЗМЕРЕНИЕ - ТОК НАГРЕВАТЕЛЯ в положение ИЗМЕРЕНИЕ и произвести отсчет по верхней шкале прибора. Полученное значение перевести в единицы давления, пользуясь кривой преобразователя (в случае преобразователя ПМТ-2) или шкалой прибора термодпарной части вакуумметра ВИТ-1А, которая проградуирована в величинах давления применительно к преобразователю ПМТ-4.

1.2. Измерение давления в диапазоне $1,33 \cdot 10^{-1} - 1,33 \cdot 10^{-5}$ Па

Когда давление в месте подключения манометрического преобразователя ПМИ-2 (ПМИ-2 - манометрический преобразователь ионизационный с горячим катодом) достигнет значения, меньшего $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па (что удостоверяется путем измерения термодпарным вакуумметром), в работу вводится ионизационный вакуумметр.

Измерение давления ионизационным преобразователем производится следующим образом:

1) установить тумблер НАКАЛ в положение против направления стрелки (выключено);

2) регулятор УСТАНОВКА ЭМИССИИ установить в крайнее левое положение;

3) переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение УСТАНОВКА ЭМИССИИ;

4) переключатель МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ перевести в положение УСТАНОВКА НУЛЯ;

5) установить тумблер СЕТЬ 220 В в положение, указанное стрелкой (включено). При этом должна загореться сигнальная лампа;

6) через 3-5 мин перевести переключатель РОД РАБОТЫ в положение ИЗМЕРЕНИЕ и ручкой УСТАНОВКА НУЛЯ установить стрелку прибора

на нуль;

7) установить тумблер НАКАЛ в положение, указанное стрелкой (включено), а переключатель РОД РАБОТЫ в положение ПРОГРЕВ. Прогреть анод ионизационного преобразователя необходимо в течение 10-15 мин;

8) после прогрева перевести переключатель РОД РАБОТЫ в положение УСТАНОВКА ЭМИССИИ и соответствующей ручкой вывести стрелку прибора на отметку 50 мкА, что соответствует току эмиссии 0,5 мА

9) установив ток эмиссии, переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение ИЗМЕРЕНИЕ и при необходимости произвести установку нуля;

10) перевести переключатель МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ в положение, при котором отсчет по прибору, измеряющему ток преобразователя, будет достаточно хорошим.

Величина ионного тока определяется как произведение отсчета по прибору соответствующего множителя переключателя МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ.

Давление в системе, соответствующее данному ионному току ионизационного преобразователя, определяется по формуле:

$$P = I_u \cdot C \cdot \beta^{-1},$$

где P - давление, Па;

I_u – ионный ток, А;

C - постоянная преобразователя, Па/А;

β - коэффициент относительно чувствительности по данному газу.

Постоянная преобразователя ПМИ-2 $C=1,33 \cdot 10^4$ Па/А при токе эмиссии 0,5 мА.

1.3. Порядок выключения ионизационного вакуумметра

Выключение ионизационного вакуумметра производится в следующей последовательности:

1) переключатель МНОЖИТЕЛЬ ШКАЛЫ перевести в положение УСТАНОВКА НУЛЯ;

2) переключатель РОД РАБОТЫ перевести в положение УСТАНОВКА ЭМИССИИ;

3) регулятор УСТАНОВКА ЭМИССИИ перевести в крайнее левое положение;

4) выключить тумблера НАКАЛ и СЕТЬ 220 В.

Нарушение указанного порядка включения и выключения приводит к повреждению измерительного прибора ионизационной части вакуумметра.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Изучение вакуумметрического метода нанесения проводящих и
резистивных покрытий

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплине «Основы технологии оптических материалов и изделий»

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