

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

Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга
(РЭТЭМ)

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий каф. РЭТЭМ
_____ В.И. Туев
« ____ » _____ 2017 г.

ФИЗИКО - ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания по выполнению курсовой работы для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»

Разработчики:
Ст. преподаватель каф. РЭТЭМ
_____ А.А. Иванов
Ассистент каф. РЭТЭМ
_____ Ю.В. Ряполова

Томск 2017

Иванов А.А., Ряполова Ю.В. Физико-химические основы технологии электронных средств: Методические указания по выполнению курсовой работы – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 37 с.

Содержатся теоретические сведения по расчету скорости осаждения, даны методические рекомендации по выполнению курсовой работы, изложены требования к пояснительной записке. Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств».

Содержание

Введение.....	4
1. ТЕХНИКА КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ	5
1.1. Техника получения вакуума	5
1.2. Техника измерения вакуума	8
1.3. Оценка времени откачки рабочего объема	10
1.4. Схема вакуумной системы технологической установки	12
1.5. Процесс катодного распыления	13
2. РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА ЗАЖИГАНИЯ, ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ.....	15
2.1. Расчет потенциала зажигания разряда	15
2.2. Расчет ВАХ разряда	16
3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА	20
3.1. Коэффициент распыления.....	20
3.2. Методика расчета коэффициента распыления	22
3.3. Расчет скорости осаждения	23
3.4. Расчет распределения пленки по толщине	25
4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КАТОДА-МИШЕНИ	26
5. Исходные данные для расчета времени откачки предварительного вакуума	28
5.1 Исходные данные для расчета ВАХ разряда, коэффициента распыления, скорости осаждения катодном распылении	29
5.2 Исходные данные для расчета температурного режима катода-мишени.....	30
6. СОСТАВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ.....	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	36

Введение

Курсовая работа является составной частью процесса изучения курса «Физико-химические основы технологии электронных средств». Ее целью является закрепление и углубление знаний, полученных при изучении курса лекций, самостоятельной работе с литературой и выполнении лабораторных работ.

Основная задача курсовой работы состоит в том, чтобы освоить методы расчета параметров ионно-плазменной обработки материалов в двухэлектродных системах катодного распыления.

Распыление материалов и образование слоев путем напыления при низких давлениях стало важным физическим и технологическим процессом при изготовлении изделий микроэлектроники и технологии производства электронных средств (ЭС).

1. ТЕХНИКА КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

1.1. Техника получения вакуума

Для получения технологического вакуума 10^{-7} мм рт. ст. применяют различные типы вакуумных насосов. В зависимости от начального давления их разделяют на две группы: форвакуумные и высоковакуумные. К первой группе относят насосы, начинающие откачку при атмосферном давлении и обеспечивающие получение предварительного вакуума (форвакуума) в 10^{-2} – 10^{-3} мм рт. ст., и высоковакуумные насосы, работающие в диапазоне от форвакуума и выше [1].

В технологических установках объединяют насосы первой и второй групп в вакуумном агрегате, в состав которого входят вакуумная камера, коммутирующие вентили, предохранительные ловушки, цепи автоматики, цепи измерения вакуума, скорости осаждения и т.д.

Основной характеристикой вакуумного насоса является **быстрота откачки**, т.е. количество газа, проходящего через впускное отверстие насоса в единицу времени (л/с).

Простейшими по принципу работы являются **форвакуумные адсорбционные** насосы, основанные на способности предварительно обезгаженных поверхностей поглощать газы за счет физической адсорбции.

В качестве адсорбента применяют цеолит. Цеолитом называют губчатое мелкопористое вещество с размером пор в несколько ангстрем. Для охлаждения адсорбента на насос надевают сосуд Дьюара с жидким азотом, а для регенерации – нагреватель. Главными недостатками адсорбционных насосов являются большой расход жидкого азота, плохая откачка водорода, имеющего наименьший размер молекулы, и инертных газов [2].

Механические форвакуумные насосы с масляным уплотнением работают за счет периодического изменения объема рабочей камеры насоса.

Качество работы механических форвакуумных насосов зависит от пригонки трущихся деталей. Уменьшение обратного натекания газа достигается за счет масляного уплотнения трущихся поверхностей. Пленка масла создает непроницаемость для газа в подвижных сочленениях.

Применяемое в качестве уплотнителя масло должно иметь низкое давление паров, не окисляться на воздухе, обладать вязкостью для создания прочной уплотнительной пленки.

Турбомолекулярные высоковакуумные насосы основаны на принципе сообщения оставшимся в высоком вакууме молекулам газа направленного движения за счет быстро движущейся поверхности. Перепад давлений пропорционален скорости, площади поверхности и молекулярному весу газа.

Конструкция откачиваемого узла турбомолекулярного насоса подобна конденсатору переменной емкости. Зазор между роторными и статорными пластинами составляет около 1 мм, пластины имеют отверстия со скошенными краями, в результате чего создается радиальное движение молекул от оси насоса. Перепад давлений, следовательно, направлен от оси к боковым стенкам. В некоторых конструкциях турбомолекулярных насосов вращение ротора может достигать до 100000 об/мин.

Турбомолекулярные насосы откачивают до 10^{-9} мм рт. ст., но обладают селективностью: для более тяжелых газов компрессия (отношение давления на выходе к давлению на входе) больше, чем для легких. Поэтому при предельном вакууме в камере остается только водород [3].

Пароструйные (диффузионные) высоковакуумные насосы работают на принципе сообщения остаточным молекулам газа дополнительной скорости и основаны на захвате молекул откачиваемого газа струей пара рабочей жидкости, которая увлекает их из откачиваемого объема. Рабочая жидкость нагревается в кипятильнике, образующийся пар поступает к соплам и выходит из них с большой скоростью.

Струя пара пересекает рабочую камеру насоса. Противоположная стенка камеры охлаждена, пар конденсируется на ней, освобождая молекулы откачиваемого газа, а конденсат стекает обратно в кипятильник. К выходному патрубку насоса присоединяется форвакуумный насос.

В качестве рабочей жидкости применяют нефтяные масла специальной перегонки, кремнийорганические жидкости и ртуть.

Масляные пароструйные насосы дешевы в эксплуатации, позволяют получить вакуум до 10^{-8} мм рт. ст. Однако возможно попадание молекул масла в откачиваемые вакуумные камеры. Молекулы масла, проникшие в технологический объем, оседают на подложках. Для улавливания молекул масла применяют различные типы ловушек [3].

Геттерно-ионные насосы имеют преимущество в том, что загрязнение углеводородом вакуумных камер сведено к минимуму, поскольку в них отсутствует интенсивный источник ионов. Геттерно-ионные насосы используют явление поглощения газов осаждаемой пленкой. Поглощение протекает как в результате хемосорбции, так и «замуровывания» инертных атомов. Газ поглощается свежесаженным на внутреннюю полость насоса слоем титана, титано-молибденового сплава или хрома при сублимационном, электронно-лучевом или ионном распылении. В последнем случае насосы называют **электроразрядными**. Процесс откачки геттерно-ионных насосов включает ионизацию остаточных молекул газа электронами, эмиттируемыми катодом. Эффективность ионизации зависит от вероятности встречи электрона с молекулой газа. Вероятность повышается с удлинением пути электронов. Для этого применяют асимметрию электрического поля или внешнее магнитное поле. Предварительно обезгаженный насос может дать вакуум до 10^{-9} мм рт. ст.

1.2. Техника измерения вакуума

Приборы для измерения полных малых давлений в вакуумной технике называются *манометрами*. В литературе и практике употребляется также термин *вакуумметры*. Большинство манометров состоит из двух элементов: датчика – преобразователя сигнала и измерительного блока [4].

По принципу действия манометры можно свести в следующие классы:

1. *Жидкостные манометры*, в которых измеряемое давление или разность давлений уравнивается давлением столба жидкости (U-образные манометры и их модификации).

2. *Компрессионные манометры*, действие которых основано на законе изотермического сжатия идеального газа (манометры Мак-Леода).

3. *Деформационные манометры*, использующие в качестве чувствительного элемента сильфон, мембрану и т.п. Величина деформации чувствительного элемента служит мерой давления.

4. *Тепловые манометры*, использующие зависимость теплопроводности газа от давления. Они подразделяются на термопарные и манометры сопротивления.

5. *Ионизационные манометры*, в которых давление определяется по значению ионного тока. Большая группа приборов этого класса подразделяется в свою очередь на:

а) *электроразрядные*, принцип действия которых основан на зависимости параметров электрического разряда в разреженном газе от давления;

б) *электронные ионизационные*, ионизация газа в которых осуществляется потоком электронов, ускоряемых электрическим полем.

Всю группу манометров можно также разделить на приборы *прямого и косвенного* действия.

Манометрами *прямого действия* являются приборы, которые непосредственно измеряют давление газа. Манометрические свойства этих манометров можно заранее рассчитать или получить с помощью градуировки по динамометрическим приборам. Отсчет давления манометра прямого действия принципиально не зависит от состава газа и его температуры. Эти приборы покрывают диапазон $10\text{--}10^3$ Па, причем их относительная погрешность тем меньше, чем выше давление. К манометрам прямого действия относятся *жидкостные, компрессионные и деформационные*. Манометры *косвенного действия* измеряют не само давление, а некоторую его функцию и, как правило, состоят из датчика (манометрического преобразователя) и радиотехнического измерительного блока. Отсчет давления (выходной сигнал) у манометров косвенного действия зависит от рода газа и его температуры [4].

Шкалы манометров косвенного действия откалиброваны в единицах давления или электрических единицах. В последнем случае к приборам прилагается переводная градуировочная кривая или приводится его чувствительность. Градуировочные кривые составляются при градуировке приборов косвенного действия по манометрам прямого действия и, строго говоря, верны только для условий, воспроизводящих условия градуировки.

Измерение давлений ниже $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па (10^{-5} мм рт. ст.) практически возможно только приборами косвенного действия, поскольку усилия при таких давлениях ничтожно малы (при $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па $\sim 1,3 \cdot 10^{-8}$ кгс/см²). Таким образом, давление как нагрузка теряет свой смысл. Более показателен при таких давлениях другой параметр – молекулярная концентрация, т.е. *плотность частиц газа в единице* объема, которую, кстати, и измеряют манометры косвенного действия [5].

При измерении давлений манометрами косвенного действия точность отсчета невелика из-за влияния большого числа трудно учитываемых факторов (изменение состава газа и его температуры, сорбционно-десорбционных

процессов в датчике и т.п.). Погрешность измерения давления обычно колеблется в пределах от 10 % до 60 % измеряемой величины.

1.3. Оценка времени откачки рабочего объема

Схема процесса откачки вакуумного колпака, под которым проводятся технологические процессы напыления, представлена на рис.1.1. Работа вакуумного насоса характеризуется скоростью откачки s_n (л/с), т.е. объемом газа при данном давлении, удаляемым насосом за единицу времени. Скорость откачки многих насосов в широкой области давлений приблизительно постоянна.

Поток газа, откачиваемый в единицу времени:

$$Q_v = p_v s_n, \quad (1.1)$$

где p_v – давление в месте измерения потока газа, мм рт. ст. ·л/с ;

$s_n = dV/dt$ – скорость откачки в насосе.

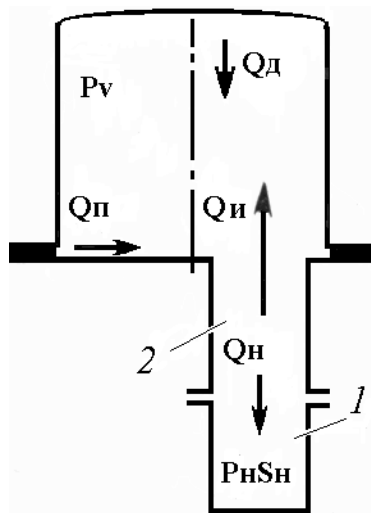


Рисунок 1.1. Схема процесса откачки

На рис. 1.1 считаем, что откачиваемый поток газа Q_u в любом сечении трубопровода 2 постоянен. В то же время давление под колпаком p_v больше давления в насосе p_n , иначе не было бы откачиваемого потока Q_u .

В сечении насоса 1 поток газа:

$$Q_n = s_n p_n, \quad (1.2)$$

где s_n, p_n – соответственно скорость откачки и давление в насосе.

В сечении трубопровода 2 у колпака поток газа

$$Q_v = s_v p_v, \quad (1.3)$$

где s_v – эффективная скорость откачки в этом сечении; p_v – давление под колпаком. Из равенств (1.2) и (1.3) можно сделать вывод, что $s_v < s_n$.

На рис 1.1: Q_d – поток газа, десорбирующийся с поверхности колпака; Q_n – поток газа, проникающий под колпак извне; Q_u – поток газа, поступающий из насоса в откачиваемую систему.

Основным уравнением, описывающим процесс откачки, является

$$V dp = dt(s_v p - Q_d - Q_n - Q_u). \quad (1.4)$$

Количество газа, удаленного из объема в течение времени dt , равно количеству газа, проходящего через насос, за вычетом количества газа, поступающего из трех источников. Знак минус означает, что dp отрицательно – это соответствует уменьшению давления. После окончания начального периода откачки Q_d , Q_n и Q_u остаются единственными источниками газа в объеме V . В конце установится равновесие, после чего давление не будет уменьшаться. Когда достигнуто предельное давление p_o , то $dp/dt = 0$ и

$$p_o s_v = Q_d + Q_n + Q_u; \quad (1.5)$$

откуда

$$s_v = \sum Q_i p_{vj}. \quad (1.6)$$

Решение уравнения (1.6) свидетельствует о зависимости давления под колпаком от времени t :

$$p_v = p \cdot \exp(-s_3 t/V) + p_o, \quad (1.7)$$

где p - начальное давление под колпаком. Откуда время откачки определяется из выражения:

$$t = \frac{V}{s_3} \ln \frac{p}{p_v - p_o}. \quad (1.8)$$

1.4. Схема вакуумной системы технологической установки

Типичная схема вакуумной системы представлена на рис.1.2. Для откачки объема колпака 7 от атмосферного давления до предельного вакуума с помощью форвакуумного насоса ФВН через открытые вентили 3 и 4 создают давление под колпаком до 10^{-1} – 10^{-2} мм рт. ст, контролируя давление с помощью термомпарного манометра 2. После этого вентиль 3 закрывают, открывают вентиль 5 и высоковакуумный затвор 1 и откачивают всю вакуумную систему до давления 10^{-1} – 10^{-2} мм рт. ст. Затем включают подогреватель высоковакуумного диффузионного насоса ВВН и производят откачку колпака через затвор 1 до предельного вакуума (10^{-6} – $5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.), контролируя давление с помощью ионизационного манометра 6. При этом ФВН должен постоянно отсасывать в атмосферу из ВВН остаточный газ. Поскольку в форбаллоне ФБ поддерживается форвакуум 10^{-1} – 10^{-2} мм рт. ст., возможно кратковременное отключение ФВН от ВВН. В этом случае выход ВВН будет нагружен только на ФБ. По окончании цикла напыления напуск осушенного воздуха в ФВН и колпак производится через вентили 3 и 4. Управление вентилями и их блокировка осуществляется с помощью блока переключения вакуума БПВ [5].

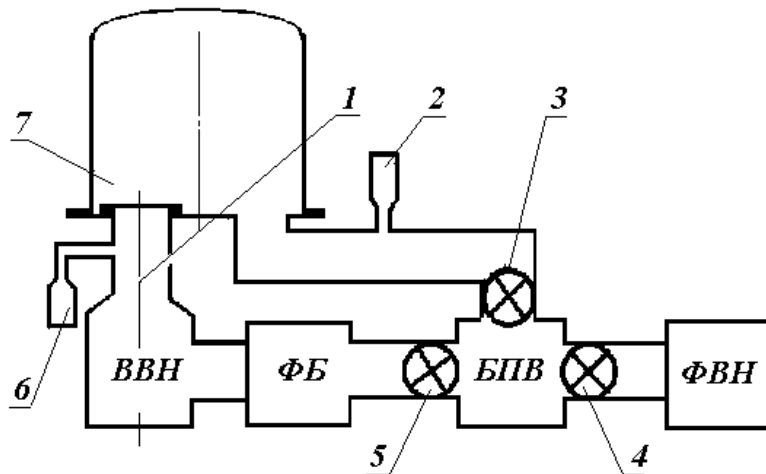


Рисунок 1.2. Схема вакуумной системы технологической установки

При выборе материалов для вакуумных систем необходимо учитывать скорость десорбции и газопроницаемость [6]. Из металлов наиболее подходящим материалом является нержавеющая сталь. Этот материал обладает низкой скоростью десорбции, т.е. низкой скоростью газоотделения с единичной поверхности. Материал устойчив против коррозии, что позволяет использовать химически агрессивные жидкости для очистки подколпачных устройств, хорошо полируется, вследствие чего в неровностях шероховатой поверхности не накапливаются гигроскопичные вещества и активные сорбенты. В то же время малоуглеродистая сталь плохо удовлетворяет требованиям вакуумной техники, поскольку окисный слой на ее поверхности обладает высокой сорбционной емкостью. Применение латуни в вакуумной технике не рекомендуется из-за заметного испарения цинка при температуре свыше 300 °С.

1.5. Процесс катодного распыления

Под катодным распылением (ионным распылением) понимается разрушение отрицательного электрода (катода) в газовом разряде под действием ударов положительных ионов [7]. В более широком смысле –

разрушение твёрдого вещества при его бомбардировке заряженными или нейтральными частицами.

При катодном распылении в камеру вакуумной установки загружаются подложки и производят откачку до давления $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ Па, затем напускают аргон до давления 1,3–13 Па. Далее процесс ведут при непрерывной откачке и поступлении через натекаТЕЛЬ аргона, что обеспечивает заданное давление газа [8]. При подаче на катод-мишень отрицательного потенциала 1–5 кВ относительно заземленного анода в камере зажигается тлеющий разряд. Ионы аргона, попавшие в область катодного пространства, бомбардируют катод – начинается его распыление. Распыление сначала ведут на заслонку, а после очистки поверхности катода заслонку открывают – поток частиц осаждается на поверхности подложек. Процесс прекращают отключением напряжения катод-анод; после охлаждения подложки выгружают [8, 9].

Преимущества катодного распыления: низкие температуры подложек в процессе нанесения пленок; большая, чем при термовакуумном напылении, равномерность пленок по площади подложек, так как диаметр катода (до 350 мм) существенно больше расстояния катод – подложка (30–80 мм); безынерционность (распыление начинается при подаче на электроды напряжения и мгновенно прекращается при его снятии); отсутствие необходимости частой смены источника частиц растущей пленки – катода; неизменяемость стехиометрии состава пленки по сравнению с составом катода; высокая адгезия пленок к подложкам.

Основные недостатки: сравнительно невысокие скорости осаждения, загрязненность пленок молекулами остаточных газов и более сложное управление техпроцессом по сравнению с термовакуумным напылением.

2. РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА ЗАЖИГАНИЯ, ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИНТЕНСИВНОСТИ ОСАЖДЕНИЯ

2.1. Расчет потенциала зажигания разряда

Для расчета потенциала зажигания в катодной системе распыления примем следующие допущения: плоские электроды располагаются на расстоянии d друг от друга; между электродами поддерживается разность потенциалов U ; электроны и ионы в межэлектродном пространстве появляются как под действием какого-либо внешнего ионизирующего излучения, так и в результате того, что часть электронов в приложенном электрическом поле приобретает энергию, превышающую потенциал ионизации нейтральных частиц, входящих в состав газа; на электроде, являющемся катодом, происходит вторичная эмиссия электронов под действием бомбардирующих катод ионов аргона; на аноде не происходит ни эмиссии, ни отражения заряженных частиц.

С учетом вторичной эмиссии электронов с катода разрядный ток определяется формулой,

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]}, \quad (2.1)$$

где i_0 – ток электронов; α – ионизационный коэффициент Таунсенда; γ – эффективный коэффициент вторичной эмиссии электронов с катода, которая происходит под действием положительных ионов, фотонов и метастабильных атомов, рождающихся в результате ионизации и возбуждения атомов электронами.

Зависимость коэффициента ионизации α от давления газа p и напряженности электрического поля определяется формулой

$$\alpha/p = A \cdot \exp\{-Bp/E\}, \quad (2.2)$$

где постоянные для аргона: $A=12 \text{ тор}^{-1}\text{см}^{-1}$, $B=176 \text{ [В/(тор}\cdot\text{см)]}$.

Если подать на электроды напряжение при котором $\mu = \gamma[\exp(\alpha d) - 1] > 1$ и знаменатель в формуле (2.1) отрицателен, то теряется ее физический смысл. Это означает, что при таком напряжении ток не может быть стационарным. С другой стороны, при $U < U_t$, когда $\mu < 1$, течет стационарный несамостоятельный ток. Условие перехода $\mu=1$ или

$$\gamma[\exp(\alpha d) - 1] = 1, \quad \alpha d = \ln(1/\gamma + 1), \quad (2.3)$$

эквивалентно условию протекания стационарного самостоятельного тока в однородном поле $E_t = U_t/d$, где соответствующее напряжение U_t определяется из равенства (2.3).

Потенциалом зажигания называют пробивающее напряжение U_t , приложенное к газовому промежутку, при превышении которого в газе зажигается самостоятельный разряд [10-13]. Эта величина и соответствующее поле пробоя E_t зависят от рода газа, материала катода, давления и длины разрядного промежутка и определяется только произведением pd . Экспериментальные кривые $U_t = f(pd)$, описывающие зависимость потенциала зажигания разряда от произведения pd , называются кривыми Пашена.

Для аргона получены следующие эмпирические формулы определения потенциала зажигания разряда:

$$U_t = \frac{176pd}{C + \ln pd}, \quad C = \ln \frac{12}{\ln(1/\gamma + 1)}, \quad (2.4)$$

где p – давление в тор; d – расстояние между электродами, в см; γ – коэффициент вторичной эмиссии, принять при расчетах равным 10^{-2} .

2.2. Расчет ВАХ разряда

1. Электроды, мишень и подложка имеют форму круга, соосны, их радиус равен r , а расстояние между ними – l .

2. Между электродами существует аномальный тлеющий разряд, электрическое поле которого E линейно спадает в катодной области шириной

d. В идеализированном случае можно считать, что на расстоянии $x=d$ к катодной области примыкает положительный разрядный столб.

3. Падение напряжения на катодной области U_k практически равно напряжению разряда $U=U_k$. Вследствие действия напряжения в катодной области электроны ускоряются в направлении к аноду (к подложке), а положительные ионы – к катоду (к мишени). Ток через любое поперечное сечение разрядного пространства определяется суммой электронной j_e и ионной j_i составляющих.

Вблизи поверхности мишени ($x=0$) преобладает ток положительных ионов I_{io} , которые при падении на мишень выбивают вторичные электроны. Эти электроны образуют начальный электронный ток через катод

$$I_{oe} = \Gamma \cdot I_{oi}, \quad (2.5)$$

где Γ - коэффициент эмиссии вторичных электронов. Для условий распыления в атмосфере аргона справедливо выражение :

$$\Gamma = 6,432 \cdot 10^{-5} U \quad (2.6)$$

при напряжениях до 35 кВ.

Образование заряженных частиц в межэлектродном пространстве происходит только за счет соударения ускоряемых электронов с нейтральными молекулами газа [14-16].

2.2.2. Определение параметров катодной области

В состоянии равновесия в плазме положительного столба справедливо следующее отношение токовых составляющих: $j_i/j_e = \sqrt{m_e/m_i}$; поэтому для общей плотности тока на границе катодной области ($x=d$) можно записать

$$j = j_d = j_{ed} \left(1 + \sqrt{m_e/m_i}\right), \quad (2.7)$$

на катоде получается следующий баланс токов:

$$j = j_o = j_{io} + j_{eo} = j_{io} (1 + \delta), \quad (2.8)$$

Для повышения степени ионизации в области разряда прикладывается магнитное поле, силовые линии которого располагаются параллельно оси электродной системы. Запишем вероятность, что на отрезке d электрон не столкнется с молекулой газа:

$$W_e = \exp(-d/\lambda_e) = \exp(-pd/\lambda_{e1}), \quad (2.9)$$

где λ_{e1} – средняя длина свободного пробега электронов в газе при давлении 1 Па (для аргона $\lambda_{e1} = 6,11 \cdot 10^{-2}$ Па·м); λ_e – средняя длина свободного пробега электронов в газе при произвольном давлении p ($\lambda_e = \lambda_{e1}/p$). Эта вероятность соответствует той компоненте электронного тока, которая не вызывает ионизации на отрезке d . Остальная часть электронов, которой соответствует вероятность $(1 - W_e)$ ионизирует сильнее вследствие действия магнитного поля, так как после столкновения траектории электронов идут параллельно магнитным силовым линиям. Таким образом, суммарный электронный ток, текущий от поверхности мишени к границе катодной области, можно выразить как

$$j_{ed} = W_e j_{eo} + (1 - W_e) \chi j_{eo} \exp\left(\int_0^d \alpha \cdot dx\right). \quad (2.10)$$

Коэффициент χ , отражающий влияние магнитного поля на ионизацию газа, в простейшем случае можно выразить как линейную функцию внешнего магнитного поля B_{mg} :

$$\chi = (1 + B_{mg} / B_o), \quad (2.11)$$

где B_o - постоянная распылительной системы ($B_o = 0,2$ Т).

Используя принцип непрерывности $j_o = j_d = j$, и из уравнений (2.7), (2.8) и (2.10) после соответствующих преобразований можно получить уравнение

$$W_e + (1 - W_e) \chi \exp\left\{\int_0^d \alpha \cdot dx\right\} = \frac{1 + 1/\Gamma}{1 + \sqrt{m_e / m_i}}. \quad (2.12)$$

Исходя из принятого характера электрического поля $E = E_o(1 - x/d)$ и используя элементарное соотношение

$$U_k = - \int_0^d E \cdot dx,$$

получаем, что $E_0=2U/d$ и $dE/dx=-E_0/d$. Так как интеграл с левой стороны уравнения (2.12) означает

$$\int_0^d \alpha \cdot dx = p d A$$

мы получаем результат, согласно которому напряжение U является функцией произведения ($p \cdot d$):

$$5,2 \cdot 10^3 / U = \exp(-pd / \lambda_{e1}) + \chi \{1 - \exp(-pd / \lambda_{e1})\} \exp(pdA) - 1. \quad (2.13)$$

Параметр $\chi=1$ соответствует режиму без магнитного поля. Для упрощения дальнейших расчетов зависимость $U=f(pd)$ можно заменить приближенным степенным выражением; для разряда в атмосфере аргона без магнитного поля мы можем записать ($\chi=1$)

$$(pd)^2 = 13,712 / U^{0,909}, \quad (2.14a)$$

при известном ненулевом магнитном поле, например при $\chi=1,25$ или $\chi=2$, получаем

$$(pd)^2 = 20,345 / U, \quad (2.14б)$$

$$(pd)^2 = 76,122 / U^{1,264}. \quad (2.14в)$$

Приведенные уравнения обеспечивают хорошую точность в диапазоне напряжений $1000 \leq U \leq 5000$ В.

2.2.3. Расчет тока разряда

При описании условий в катодной области исходили из элементарных соотношений для ионных составляющих тока :

$$j_i = \rho \cdot v_i,$$

$$\rho = \varepsilon_0 \operatorname{div} E,$$

$$0,5 m_i v_i^2 = e \cdot \varphi.$$

Из последнего уравнения выводим среднее значение скорости на интервале по оси абсцисс $0 \leq x \leq d$

$$v_i = \sqrt{eU / (2m_i)}.$$

Тогда ток положительных ионов, текущий к катоду, получается равным

$$j_{i0} = \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_i}} \frac{U^{3/2}}{d^2}. \quad (2.15)$$

Для случая распыления в атмосфере аргона уравнение (2.15) можно преобразовать в следующую форму:

$$j_{i0} = 1,95 \cdot 10^{-8} \frac{U^{3/2} p^2}{(pd)^2}, \text{ [A/m}^2\text{]}. \quad (2.16)$$

Тогда суммарную величину плотности тока на поверхности мишени определим с помощью уравнений (2.6), (2.8) и (2.16):

$$j_{i0} = 1,95 \cdot 10^{-8} \frac{U^{3/2} p^2}{(pd)^2} (1 + 6,432 \cdot 10^{-5} U). \quad (2.17)$$

Расчет упрощается, если в уравнение (2.17) подставим значения $(pd)^2$ из уравнений (2.14а, б, в); для $\chi = 1,0$; 1,25 и 2,0 получаются следующие результирующие выражения:

$$j = 1,422 \cdot 10^{-9} p^2 U^{2,409} (1 + 6,432 \cdot 10^{-5} U), \quad (2.18а)$$

$$j = 9,585 \cdot 10^{-10} p^2 U^{2,5} (1 + 6,432 \cdot 10^{-5} U), \quad (2.18б)$$

$$j = 2,562 \cdot 10^{-10} p^2 U^{2,764} (1 + 6,432 \cdot 10^{-5} U). \quad (2.18в)$$

3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА

3.1. Коэффициент распыления

Для характеристики процесса ионного распыления используется параметр K , называемый коэффициентом распыления. Коэффициент распыления определяется как количество распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион (атом/ион) [17].

Когда состав распыленных частиц многоэлементный, например, при распылении многокомпонентных материалов, для характеристики распыления используются парциальные (селективные) коэффициенты распыления

отдельных компонентов или коэффициент распыления, выраженный в единицах молекула/ион. Для характеристики процесса распыления полимерных соединений типа фоторезистов, имеющих молекулы с очень большим числом атомов, понятие коэффициента распыления теряет смысл, поскольку совершенно неопределенным становится состав продуктов распыления. В этом случае оперируют понятием скорости распыления, характеризующим толщину удаленного слоя материала в единицу времени при заданной мощности ионной обработки. Скорость и коэффициент распыления связаны соотношением

$$K = \frac{eN_a\rho}{jM_2}V_p, \quad (3.1)$$

где e – заряд электрона, Кл;

ρ – плотность материала, г/см³;

j – плотность тока ионов, А/см²;

M_2 – масса атомов материала, г/моль;

N_a – число Авогадро, моль⁻¹;

$V_p = h/t$ – скорость распыления, где h – толщина стравливаемого слоя материала, см, а t – время распыления, с.

Установлено, что эффективность процесса распыления определяется:

- зависимостью коэффициента распыления от характеристик бомбардирующих ионов: атомного номера, массы, энергии, направленности движения ионов по отношению к обрабатываемому материалу;
- характеристикой обрабатываемого материала: атомным номером, массой, относительной плотностью, энергией связи атомов, составляющих материал, степенью кристалличности материала и состоянием его поверхности;
- плотностью тока бомбардирующих ионов;
- влиянием среды: давлением и составом остаточных и рабочих газов, наличием различного рода излучений и т.п.

3.2. Методика расчета коэффициента распыления

В основу методики расчета коэффициента распыления положен метод, предложенный В.Юдиным [3]. Он существенно упрощает процедуру расчетов при разработке технологических циклов ионной и ионно-плазменной обработки широкого класса материалов.

3.2.1. Рассчитывается радиус экранирования ядра электронной оболочкой, сечение экранирования, нормирующий множитель энергии иона

$$a = 0,8853a_B/(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} \text{ см}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_a = \pi a^2 \text{ см}^2, \quad (3.3)$$

$$F = 6,9 \cdot 10^6 a M_2 / [Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)] \text{ эВ}, \quad (3.4)$$

где $a_B = 5,29 \cdot 10^{-9}$ см - радиус Бора; Z_1, Z_2 и M_1, M_2 - атомные номера и массы ускоренного иона (1) и атома мишени (2).

3.2.2. Вычисляются безразмерное значение энергии сублимации и энергия максимума иона, соответствующая максимальному значению коэффициента распыления:

$$\varepsilon_s = F \cdot E_s, \quad (3.5)$$

$$E_m = 0,3 / F \text{ эВ}, \quad (3.6)$$

где E_s - энергия сублимации материала, эВ.

3.2.3. Определяется коэффициент, учитывающий периодические осцилляции коэффициента распыления в зависимости от расположения элемента в периодической таблице элементов Д.И.Менделеева:

$$K_o = 1,3 \cdot 10^{-10} Z_2^{1/2} - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18) \text{ см при } 3 \leq Z \leq 16, \quad (3.7)$$

$$K_o = K_i + \Delta K (Z_2 - Z_0) - 4,65 \cdot 10^{-12} (Z_1 - 18) \text{ см при } Z_2 > 16.$$

Значения постоянных K_i , ΔK и Z_0 приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Диапазон Z_2	$K_i \cdot 10^{10}$, см	$\Delta K \cdot 10^{11}$, см	Z_0
19 - 25	5,8	-1,0	19

26 - 31	3,38	11,1	26
32 - 46	8,5	-0,715	32
47 - 48	9,8	14,0	47
49 - 61	12,4	-3,5	49
62 - 69	8,0	8,33	62

3.2.4. Находится значение максимального коэффициента распыления

$$K_{max} = K_0 N_2 \sigma_a / \varepsilon_s \quad \text{ат/ион}, \quad (3.8)$$

где N_2 - собственная концентрация атомов в материале мишени, ат/см³.

3.2.5. Определяется коэффициент распыления $K(E)$, используя следующее выражение:

$$K = K_{max} \{ 2(E/E_m)^{1/2} / (1 + E/E_m) \}. \quad (3.9)$$

3.3. Расчет скорости осаждения

В процессах ионно-плазменного нанесения при высоких давлениях исчезает направленность движения распыленных частиц и процесс переноса принимает характер «ускоренной» диффузии. Понятие «ускоренной» определяет высокую кинетическую энергию, следовательно, скорость движения исходных, эмиттируемых из мишени частиц материала. В большинстве систем ионно-плазменного нанесения с тлеющим разрядом частицы распыленного материала уменьшают свою энергию до тепловой энергии прежде, чем достигнут подложки. Процесс переноса в этом случае следует рассматривать как диффузионный процесс.

Часть распыленных частиц в результате многократных столкновений и рассеяния на большие углы, в конце концов, будет иметь нулевую скорость по направлению к подложке, а также может отражаться обратно на распыляемую мишень. Оставшиеся частицы достигают подложки со скоростями, соответствующими тепловым энергиям. Создается градиент плотности

распыленных частиц в пространстве мишень–подложка, вызывающий диффузию частиц по направлению к подложке.

В предположении диффузионного характера процесса переноса распыленного материала в пространстве мишень–подложка процент распыленного материала Π , достигающего подложки, можно определить из выражения

$$\Pi = \frac{M_1 \lambda}{M_2 D} [1 - \exp[-DM_2 / (M_1 \cdot \lambda)]] \cdot 100, \quad (3.10)$$

где D – расстояние мишень – подложка, см; λ – длина свободного пробега распыленных атомов, см; M_1 – масса атома инертного газа; M_2 – масса распыленного атома.

Длина свободного пробега атома с массой M_2 , имеющего тепловую энергию в газе, состоящем из атомов M_1 , может быть определена соотношением

$$1/\lambda = \sqrt{2} \cdot \pi N_2 d_2^2 + 0,25 \pi N_1 (d_1 + d_2)^2 (1 + M_2/M_1)^{1/2}, \quad (3.11)$$

где N_2 и N_1 – плотности распыленных частиц и атомов газа соответственно, см⁻³; d_1 и d_2 – эффективные диаметры атомов, см.

Длина свободного пробега распыленных атомов, имеющих скорость, большую, чем тепловая, будет примерно в 1,5 раза выше, т.е. диффузия имеет характер ускоренной диффузии. Практически всегда при самом высоком коэффициенте распыления $N_2 \ll N_1$. С учетом того, что $N_1 = p/kT$, выражение (3.11) можно записать

$$1/\lambda = 2.08p(d_1 + d_2)^2(1 + M_2/M_1)^{1/2}, \quad (3.12)$$

где p – давление газа, Па; d_1 и d_2 в нм. Величина d_2 изменяется от 0,3 нм при $M_2 = 20$ а.е.м. до 0,45 нм при $M_2 = 150$ а.е.м. Для аргона $d_1 \sim 0,25$ нм.

Таким образом, выражение для скорости осаждения с учетом выражений (3.1) и (3.10) можно записать как

$$V_0 = V_p \Pi / 100. \quad (3.13)$$

3.4. Расчет распределения пленки по толщине

Для расчета распределения пленки по толщине можно воспользоваться формулами, полученными для дискового испарителя:

$$d = \frac{M_e}{2\pi \rho s^2} \left\{ 1 - \frac{1 + (l/h)^2 - (s/h)^2}{\{[1 - (l/h)^2 + (s/h)^2]^2 + 4(l/h)^2\}^{1/2}} \right\} \quad (3.14)$$

и

$$d_0 = \frac{M_e}{2\pi \rho s^2} \frac{2(s/h)^2}{[1 + (s/h)^2]}, \quad (3.15)$$

где d – толщина пленки;

d_0 – толщина пленки в центре подложки;

M_e – масса испаренного вещества;

ρ – плотность материала мишени;

s – радиус диска мишени;

h – расстояние «мишень-подложка»;

l – расстояние от центра подложки до точки расчета толщины пленки на подложке.

4. РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА КАТОДА-МИШЕНИ

Основной элемент распылительного устройства – мишень, которая непосредственно является катодом или крепится на поверхности катода. Учитывая существенную тепловую нагрузку на мишень в процессе ее распыления, в конструкции ионно-плазменных устройств предусматривается прямое или косвенное охлаждение мишени. Основным недостатком косвенных методов охлаждения является ограничение мощности, вводимой в мишень. Таким образом, тепло, выделяемое при бомбардировке ионами, может отводиться за счет излучения, процесса теплопроводности и теплоотдачи при контакте охлаждающей жидкости с поверхностью мишени. Процессы передачи тепла будем считать установившимися (стационарными).

Для оценки теплового режима катода-мишени будем считать, что вся мощность, прикладываемая к мишени, расходуется на нагрев мишени. В установившемся режиме можно записать:

$$w = w_{\text{менл}} + w_{\text{изл}}, \quad (4.1)$$

где $w_{\text{менл}}$ – плотность мощности передаваемая нижнему основанию мишени; $w_{\text{изл}}$ – плотность мощности, излучаемая верхним основанием мишени.

Плотность мощности, прикладываемая к мишени, определяется из выражения:

$$w = J \cdot U, \quad (4.2)$$

где J – плотность тока разряда, U – напряжение, прикладываемое к электродам.

В соответствии с законом Фурье для стационарной теплопроводности можно записать:

$$w_{\text{менл}} = \lambda \Delta T / H, \quad (4.3)$$

где ΔT – разность температур между поверхностями мишени; H – толщина мишени; λ – коэффициент теплопроводности материала мишени.

При контакте охлаждающей жидкости с поверхностью мишени происходит передача тепла от основания мишени жидкости. Для этого случая можно записать

$$Q_{жидк} = \alpha A t \Delta T, \quad (4.4)$$

где $Q_{жидк}$ – передаваемое количество теплоты; α – коэффициент теплоотдачи (для текущей воды $\alpha = 350 + 2100\sqrt{v}$ Вт/(м²·К), v – скорость течения воды); A – площадь основания мишени; ΔT – разность температур мишени и подводимой воды (можно считать, что температура подводимой воды 20 °С, а охлаждаемого основания мишени - 100 °С); t – продолжительность процесса распыления. Формулу (4.4) запишем в преобразованном виде:

$$w_{жидк} = \alpha \Delta T. \quad (4.5)$$

Для того, чтобы мишень не перегревалась необходимо выполнение условия $w_{жидк} \geq w_{тепл}$.

При тепловом излучении тепловая энергия от верхнего основания мишени передается окружающей среде. В этом случае, исходя из закона Стефана-Больцмана, можно записать

$$w_{изл} = \sigma \varepsilon (T_g^4 - T_c^4), \quad (4.5)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; ε - излучательная способность материала мишени; T_c - температура окружающей среды ($T_c = 300$ К).

С учетом формул (4.2), (4.3) и (4.5) следует, что максимально допустимая толщина мишени равна

$$h_{\max} = \frac{\lambda \Delta T}{w - w_{изл}}. \quad (4.6)$$

5. Исходные данные для расчета времени откачки предварительного вакуума

Таблица 1.1

$N_{вар}$	$P, Па$	$P_v, Па$	$P_o, Па$	$\Sigma Q_i, м^3 \cdot Па/с$	$S_n, л/с$	$V_{раб.об.}, м^3, 10^{-3}$
1	10^5	1	0,1	$2 \cdot 10^{-4}$	6	80
2	- // -	- // -	- // -	$3 \cdot 10^{-4}$	7	90
3	- // -	- // -	- // -	$4 \cdot 10^{-4}$	8	100
4	- // -	- // -	- // -	$5 \cdot 10^{-4}$	9	110
5	- // -	- // -	- // -	$6 \cdot 10^{-4}$	10	120
6	- // -	2	0,2	$2 \cdot 10^{-4}$	6	80
7	- // -	- // -	- // -	$3 \cdot 10^{-4}$	7	90
8	- // -	- // -	- // -	$4 \cdot 10^{-4}$	8	100
9	- // -	- // -	- // -	$5 \cdot 10^{-4}$	9	110
10	- // -	- // -	- // -	$6 \cdot 10^{-4}$	10	120
11	- // -	3	0,3	$2 \cdot 10^{-4}$	6	80
12	- // -	- // -	- // -	$3 \cdot 10^{-4}$	7	90
13	- // -	- // -	- // -	$4 \cdot 10^{-4}$	8	100
14	- // -	- // -	- // -	$5 \cdot 10^{-4}$	9	110
15	- // -	- // -	- // -	$6 \cdot 10^{-4}$	10	120
16	- // -	4	0,4	$2 \cdot 10^{-4}$	6	80
17	- // -	- // -	- // -	$3 \cdot 10^{-4}$	7	90
18	- // -	- // -	- // -	$4 \cdot 10^{-4}$	8	100
19	- // -	- // -	- // -	$5 \cdot 10^{-4}$	9	110
20	- // -	- // -	- // -	$6 \cdot 10^{-4}$	10	120
21	- // -	5	0,5	$2 \cdot 10^{-4}$	6	80
22	- // -	- // -	- // -	$3 \cdot 10^{-4}$	7	90
23	- // -	- // -	- // -	$4 \cdot 10^{-4}$	8	100
24	- // -	- // -	- // -	$5 \cdot 10^{-4}$	9	110
25	- // -	- // -	- // -	$6 \cdot 10^{-4}$	10	120

5.1 Исходные данные для расчета ВАХ разряда, коэффициента распыления, скорости осаждения катодном распылении

<i>N вар</i>	<i>r, мм</i>	<i>P, мм рт.ст.</i>	<i>χ</i>	<i>Элемент</i>	<i>Z₂</i>	<i>E_s, эВ</i>	<i>ρ, г/см³</i>
1	50	1·10 ⁻³	1	Be	4	3,48	1,85
2	60	2·10 ⁻³	1	Mg	12	1,59	1,74
3	70	3·10 ⁻³	1	Al	13	3,25	2,67
4	80	4·10 ⁻³	1	Si	14	3,91	2,33
5	90	5·10 ⁻³	1	Ti	22	4,34	4,50
6	50	1·10 ⁻³	1,25	V	23	3,70	5,96
7	60	2·10 ⁻³	1,25	Cr	24	3,48	7,18
8	70	3·10 ⁻³	1,25	Mn	25	3,15	7,44
9	80	4·10 ⁻³	1,25	Fe	26	4,15	7,87
10	90	5·10 ⁻³	1,25	Co	27	4,38	8,90
11	50	1·10 ⁻³	1,5	Ni	28	4,41	8,91
12	60	2·10 ⁻³	1,5	Cu	29	3,56	8,96
13	70	3·10 ⁻³	1,5	Zn	30	1,19	7,13
14	80	4·10 ⁻³	1,5	Ge	32	3,77	5,32
15	90	5·10 ⁻³	1,5	Se	34	2,67	4,79
16	50	1·10 ⁻³	2	Zr	40	5,43	6,45
17	60	2·10 ⁻³	2	Nb	41	7,50	8,57
18	70	3·10 ⁻³	2	Mo	42	6,90	10,22
19	80	4·10 ⁻³	2	Pd	46	4,80	12,02
20	90	5·10 ⁻³	2	Ag	47	2,70	10,50
21	50	1·10 ⁻³	1,25	Cd	48	1,17	8,65
22	60	2·10 ⁻³	1,25	In	49	2,33	7,31
23	70	3·10 ⁻³	1,25	Sn	50	3,00	5,85
24	80	4·10 ⁻³	1,25	Sb	51	1,75	6,69
25	90	5·10 ⁻³	1,25	C	6	7,41	2,30

1. Найти размер катодной области d .
2. Найти коэффициент ионизации α .
3. Найти коэффициент вторичной эмиссии Γ .
4. Построить ВАХ разряда при $1000 \text{ В} \leq U \leq 5000 \text{ В}$.
5. Считать, что разряд происходит в атмосфере аргона и расстояние D от катода до анода равно $2d$.
6. Найти максимальный коэффициент распыления, скорость распыления и скорость осаждения.

5.2 Исходные данные для расчета температурного режима катода-мишени

<i>N вар</i>	<i>Элемент</i>	ε	$\lambda_{600 K}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$V_{\text{воды}}, \text{м}/\text{с}$
1	Be	0,1	160	0,2
2	Mg	0,1	153	0,3
3	Al	0,1	240	0,4
4	Si	0,1	99	0,5
5	Ti	0,1	20	0,6
6	V	0,2	31	0,2
7	Cr	0,2	91	0,3
8	Mn	0,2	8	0,4
9	Fe	0,2	70	0,5
10	Co	0,2	85	0,6
11	Ni	0,3	80	0,2
12	Cu	0,3	393	0,3
13	Zn	0,3	111	0,4
14	Ge	0,3	43	0,5
15	Se	0,3	5,4	0,6
16	Zr	0,4	22	0,2
17	Nb	0,4	55	0,3
18	Mo	0,4	134	0,4
19	Pd	0,4	74	0,5
20	Ag	0,4	425	0,6
21	Cd	0,5	95	0,01
22	In	0,5	75	0,02
23	Sn	0,5	62	0,03
24	Sb	0,5	21	0,04
25	C	0,5	4,1	0,05

1. Считать, что температура рабочей поверхности мишени 600 К.
2. Определить оптимальную толщину катода-мишени при условии, что вся мощность разряда прикладывается к мишени.
3. Тепло от мишени отводится за счет излучения и подводимой воды.
4. Определить рабочую точку на ВАХ разряда для данного теплового режима.

6. СОСТАВ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ

В пояснительной записке к курсовой работе должны быть представлены следующие обязательные материалы:

Титульный лист.

Исходные данные для расчетов.

СОДЕРЖАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ.

1. ТЕХНИКА КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

1.1. Техника получения вакуума.

1.2. Техника измерения низких давлений.

1.3. Схема вакуумной системы технологической установки.

1.4. Конструктивные особенности установки катодного распыления.

1.5. Расчет времени откачки предварительного вакуума.

2. ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

2.1. Типичные разряды в постоянном электрическом поле.

2.2. Условия существования разряда в газах.

2.3. Расчет потенциала зажигания.

2.4. Вольт-амперная характеристика разряда между электродами

2.5. Расчет вольт-амперной характеристики аномального разряда при катодном распылении.

3. ТЕОРИЯ КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

3.1. Физические модели катодного распыления.

3.2. Коэффициент распыления и факторы, влияющие на его величину.

3.3. Технологические особенности процесса катодного распыления.

3.4. Расчет коэффициента распыления.

4. ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА И КОНДЕНСАЦИИ РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА

4.1. Перенос распыленного материала от мишени к поверхности конденсации.

4.2. Расчет скорости осаждения.

4.3. Расчет распределения пленки по толщине.

4.4. Методы контроля скорости осаждения и толщины тонких пленок.

4.5. Влияние параметров конденсации на свойства пленок.

5. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КАТОДНОМ РАСПЫЛЕНИИ

5.1. Способы переноса тепловой энергии.

5.2. Расчет температурного режима катода-мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ПРИЛОЖЕНИЯ

7. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Оформление пояснительной записки (ПЗ) должно удовлетворять общим требованиям к текстовым документам согласно ЕСКД и ОС ТУСУР [01-2013]. ПЗ оформляется на листах формата А4 в редакторе WORD, шрифт 14 через 1,5 интервала. Текст размещается на одной стороне листа. Задание подшивается после титульного листа, затем идут содержание (с основной надписью), введение и т.д. В содержание вносятся только наименования разделов и подразделов. Введение и заключение не номеруются. Разделы, подразделы и пункты номеруются, а их заголовки отделяются от текста дополнительными интервалами.

2. Титульный лист выполняется согласно ОС ТУСУР.

3. При выборе и обосновании принимаемых конструктивных решений, конструкционных материалов, физических величин, расчетных коэффициентов и т.д. необходимо делать ссылки на литературу с указанием номера источника (из списка), а также номера страницы, таблицы, рисунка, например: [1, с.612, таблица ПЗ.7], [2, с.83, рисунок П4], [3, с.65].

4. Таблицы и рисунки (графики), представленные в пояснительной записке должны быть пронумерованы и подписаны согласно ОС ТУСУР. Номеруются по разделам и подписываются таблицы сверху, а рисунки снизу. Например: Таблица 2.1 – Результаты предварительных расчетов АЧХ. Рисунок 3.1 Схема усилительного каскада. На все таблицы и рисунки должны быть ссылки в тексте ПЗ.

5. В расчетной части ПЗ должна соблюдаться следующая последовательность записи:

- краткие пояснения цели расчета и ссылка на литературу (если расчет производится на основании аналитических выражений);

- выражение в общем виде (формула) и номер формулы в круглых скобках по правому полю листа;

- расшифровка вновь введенных условных (буквенных) обозначений физических величин, а для коэффициентов, взятых из справочной литературы, должна быть еще ссылка на источник, (литературу);

- запись выражения в числовых значениях физических величин в той же последовательности, что и их условные обозначения в формуле;

- результат расчета;

- числовое значение и размерность через пробел.

В конце расчёта должны быть сделаны краткие выводы.

6. В заключении необходимо дать краткий анализ принятых схмотехнических и конструктивных решений, провести сравнение достоинств и недостатков разработанной конструкции с существующими прототипами, сделать выводы о реализации технического задания и указать возможные пути совершенствования разработанного устройства.

7. Литература содержит список учебной, научной литературы, научных статей, законодательных и нормативных актов и проч., использованных источников при выполнении курсовой работы.

Защита разрешается только при наличии зачетной книжки и допуска руководителя проектирования к защите. Защита курсовой работы имеет своей целью выявить и оценить:

- качество знаний студента, полученных при выполнении курсовой работы;

- умение технически грамотно принимать и обосновывать схмотехнические и конструктивные решения;

- умение пользоваться технической и справочной литературой;

- качество оформления ПЗ и соблюдение требований стандартов;

-знание и умение использовать системные средства автоматизации инженерного труда и т.д.

Вместе с тем защита позволяет оценить степень владения студентом теоретическим материалом по теме курсовой работы. При оценке курсовой работы учитывается: качество оформления пояснительной записки; правильность и обоснованность принятых конструктивных решений; качество расчетов и использование технических средств; качество защиты, умение обосновывать и защищать принятые решения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно–плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986. – 232 с.
2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 328 с.
3. Юдин В.В. Коэффициент распыления изотропных мишеней // Электронная техника. Сер. 2. 1984. Вып. 6(172). С. 3 – 16.
4. Попов В.Ф., Горин Ю.Н. Процессы и установки электронно-ионной технологии. – М.: Высшая школа, 1988. – 255 с.
5. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел. – М.: Мир, 1989. - 349 с.
6. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1982.
7. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М.: Высшая школа, 1987.
8. Технология тонких пленок: Справочник / Под ред. Л.Майселла и Р.Гленга. В 2 т. – М.: Сов.радио, 1977.
9. Пичугин И.Г., Таиров Ю.М. Технология полупроводниковых приборов. – М.: Высшая школа, 1984. – 288 с.
10. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. – М.: Высшая школа, 1986. – 464 с.
11. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
12. Чен Ф. Введение в физику плазмы. – М.: Мир, 1987. – 398 с.
13. Иванов–Есипович Н.К. Технология микросхем. – М.: Высшая школа, 1972. – 256 с.

14. Телеснин Р.В Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1973. – 360 с.
15. Физические величины: Справочник / А.П.Бабичев, Н.А.Бабушкина, А.М.Братковский и др.; Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. –1232 с.
16. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
17. Основы вакуумной техники. – М.: Энергия, 1975. – 416 с.
18. Томилин В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. И. Томилин. – М.: Издательский центр «Академия», 2010.– 416 с.
19. Смирнов, В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебное пособие / В. И. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2005.– 112 с.