

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК МАГНЕТРОННЫМ СПОСОБОМ**

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

2012

**Орликов, Леонид Николаевич.**

Исследование процесса нанесения пленок магнетронным способом = 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. - 23 с.

Целью настоящей работы является изучение методов распыления в электрическом и магнитном поле (магнетронное распыление) и приемов работы на установках технологического назначения, ознакомление с принципами действия и основными характеристиками аппаратуры, применяемой для контроля технологических операций.

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению «Фотоника и оптоинформатика» по курсу «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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК МАГНЕТРОННЫМ СПОСОБОМ

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 Основные вопросы теории .....	5
2.1 Особенности существования магнетронного разряда и принципиальная схема магнетрона.....	5
2.2 Параметры магнетронных распылительных систем .....	7
2.3 Параметры плазмы .....	8
2.4 Магнитное поле магнетрона .....	9
2.5 Вольт-амперные характеристики магнетронных систем.....	10
2.6 Особенности конденсации ионнораспыленных атомов.....	12
2.7 Конструктивные схемы магнетронных систем.....	14
2.8 Геометрические параметры магнетронных систем .....	15
3 Экспериментальная часть.....	17
3.1 Вакуумное оборудование .....	17
3.2 Электронное оборудование.....	18
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания.....	19
3.4 Вопросы для самопроверки.....	21
3.5 Содержание отчета.....	21
4 Рекомендуемая литература .....	22

## 1 Введение

Распыление в электрическом и магнитном поле (магнетронное распыление), по сравнению с другими методами нанесения пленок в вакууме, обладает рядом достоинств, основными из которых являются высокая скорость роста пленок (сотни нанометров в секунду), их хорошая адгезия и незначительное загрязнение посторонними газовыми включениями, низкая температура нагрева подложки, возможность распыления как проводящих, так и диэлектрических материалов. Относительная простота реализации способа магнетронного распыления и широкий диапазон рабочих давлений ( $10-10^{-2}$  Па) обусловили бурное развитие подобных систем в различных областях науки и техники.

## 2 Основные вопросы теории

### 2.1 Особенности существования магнетронного разряда и принципиальная схема магнетрона

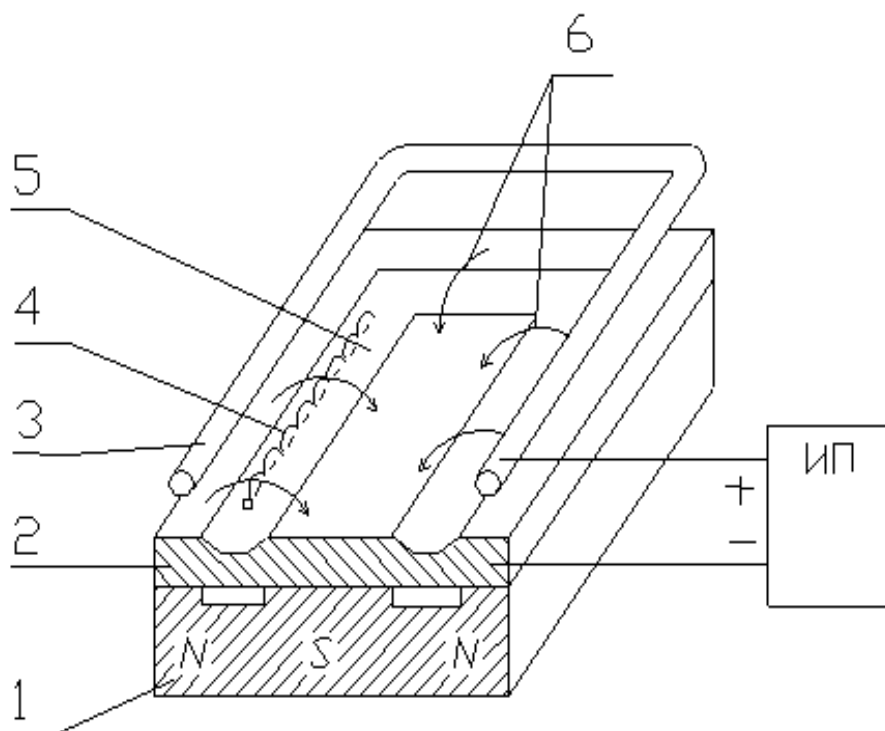
Характерные области применения магнетронных распылительных систем представлены на рис.2.1.

Магнетронная распылительная система состоит из постоянного магнита 1 (рис.2.2), над которым расположена мишень-катод 2. Над мишенью по периферии монтируется анод 3. Вся система помещается под колпаком вакуумной установки. При обеспечении давления  $1-10^{-2}$  Па в камеру подается рабочий газ (чаще всего используется аргон). На электроды системы подается высокое напряжение ( $0.5-10$  кВ). На мишень подают отрицательный потенциал, на анод – положительный. В системе возникает аномальный тлеющий разряд. Ионы из плазмы разряда бомбардируют мишень. Частицы материала мишени и его пары оседают на подложке. Эмитированные катодом-мишенью электроны удерживаются магнитным полем до их столкновения с атомами газа. При столкновении с газом электроны теряют большую часть энергии на ионизацию молекул газа (прежде чем они попадут на анод), что увеличивает концентрацию положительных ионов у поверхности мишени-катода, а также усиливает ее ионную бомбардировку и скорость распыления материала.

Для магнетронных распылительных установок характерно пересечение электрического и магнитного полей, наличие магнитной ловушки для электронов у распыляемой поверхности мишени и отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетическими вторичными электронами, которые захватываются магнитной ловушкой. Это обеспечивает незначительный нагрев подложки, что позволяет использовать магнетронные установки для нанесения пленок на такие материалы как бумага, оргстекло, пластики, обладающие низкой термостойкостью.



Рисунок 2.2 - Характерные области применения магнетронных распылительных систем



1 – постоянный магнит, 2 – мишень-катод, 3 – анод,  
4 – траектория движения электронов, 5 – зона распыления,  
6 – силовые линии магнитного поля, ИП – источник питания.

Рисунок 2.1 - Планарная магнетронная распылительная система с плоской мишенью

## 2.2 Параметры магнетронных распылительных систем

Стабильность и воспроизводимость наносимых на подложки пленок зависит от оптимальных размеров магнетронной распылительной системы, основными параметрами которой являются напряжение питания электродов, ток разряда, плотность тока на мишени, удельная мощность, индукция магнитного поля, рабочее давление.

Напряжение питания обычно не превышает  $8000\text{ В}$ . Плотность тока на мишени колеблется от  $40\text{ мА см}^{-2}$  до  $200\text{ мА см}^{-2}$  и ограничена переходом разряда в другую форму. Удельная мощность магнетрона лежит в интервале  $40\text{-}100\text{ Вт см}^{-2}$  и определяется условиями охлаждения и теплопроводностью распыляемого материала.

Важнейшим параметром магнетронных распылительных систем является вольт-амперная характеристика разряда, зависящая от рабочего давления и индукции магнитного поля. Рабочее давление зависит от условий

напыления пленок и обеспечивается конструктивными особенностями магнетрона. Обычно оно составляет  $10-10^{-2}$  Па. С ростом индукции магнитного поля рабочее давление уменьшается. При постоянном же давлении увеличение магнитного поля приводит к росту тока разряда.

В процессе проведения экспериментов управляют одним параметром, оставляя постоянными другие (например, регулируют толщину пленки, изменяя время осаждения или ток разряда).

### 2.3 Параметры плазмы

Важным параметром плазмы для магнетронных систем является дебаевский радиус экранирования  $\lambda_D$ , показывающий взаимодействие частиц между собой

$$\lambda_D = 49 \left( \frac{T}{n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1.)$$

где  $T$  – температура плазмы, К;

$n$  – концентрация ионов или электронов,  $\text{м}^{-3}$ .

В качестве меры неидеальности плазмы обычно употребляется дебаевское число  $N_D$ , т.е. число частиц в дебаевской сфере:

$$N_D = \left( \frac{4\pi}{3} \right) \cdot n \lambda_D^3, \quad (2.2.)$$

Для магнетронных систем  $N_D \geq 10^2$ .

Другой особенностью магнетронного распыления является изменение интенсивности спектра свечения плазмы, что связано с изменением электронной температуры, прогревом системы и переходом от режима тренировки и обезгаживания к режиму распыления материала. Этот процесс связан с изменением вольт-амперной характеристики разряда и смещением спектра в коротковолновую часть.

В состоянии теплового равновесия частицы плазмы имеют максвелловское распределение по скоростям (энергиям) и им соответствует определенная температура  $T$ . Температуру удобно измерять в энергетических единицах – электронвольтах ( $1 \text{ эВ} = 11600 \text{ К}$ ). На рис.2.3. представлены некоторые параметры плазмы.



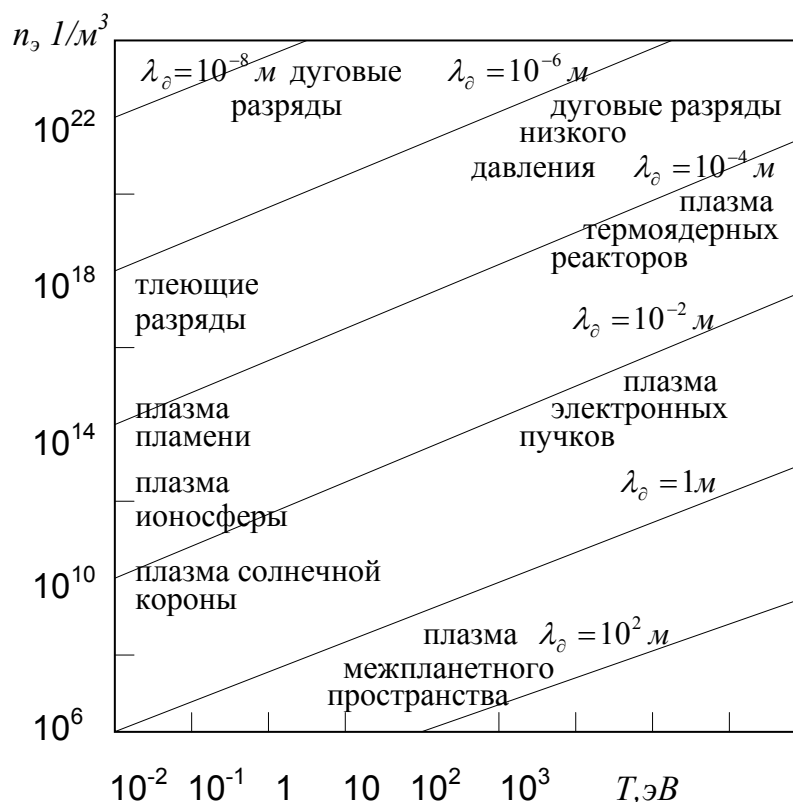


Рисунок 2.3 - Параметры плазмы

## 2.4 Магнитное поле магнетрона

Магнитное поле магнетрона обеспечивает условия поддержания разряда, а также выполняет функцию магнитной ловушки для электронов, имеющих направление к подложке. Зная составляющую скорости частицы в направлении, силовым линиям магнитного поля,  $v_{\perp}$ , можно найти минимальную индукцию магнитного поля для магнитной ловушки ( $B_{\min}$ ).

Ларморовский радиус траектории электрона  $r_{\Lambda}$  выражается следующей формулой:

$$r_{\Lambda} = \frac{v_{\perp} \cdot m}{\bar{e} \cdot z \cdot B}, \quad (2.3.)$$

где  $m$  – масса электрона;

$\bar{e}$  – заряд электрона;

$z$  – кратность заряда частицы, в первом приближении в условиях работы магнетрона, равна 1.

Кинетическая энергия электрона определяется по формуле:

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} = eU, \quad (2.4.)$$

где  $v$  – скорость движения электрона вдоль электрического поля с разностью потенциалов  $U$ .

Для магнетрона важен угол разлета частиц  $\varphi$ , зависящий от перпендикулярной составляющей скорости

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \varphi = 5.9 \cdot 10^5 \sqrt{U} . \quad (2.5.)$$

В первом приближении ориентировочно  $\varphi = 5^{\circ} = 0.0872 \text{ рад}$ . С учетом отношения (2.3.) минимальная индукция магнитного поля, необходимая для магнетрона, определяется выражением (2.6.)

$$B_{\min} = \frac{v_{\perp} \cdot m}{e \cdot z \cdot r_{\Lambda}} , \quad (2.6.)$$

В частности при  $U = 5 \text{ кВ}$ ,  $r_{\Lambda} = 2 \text{ мм}$  (что соответствует большинству параметров магнетрона)  $B_{\min} = 0.233 \text{ Тл}$ .

## 2.5 Вольт-амперные характеристики магнетронных систем

Типичные вольт-амперные характеристики магнетронной системы приведены на рис.2.4. и рис.2.5.

Вольт-амперные характеристики в первом приближении описываются уравнением (2.7.)

$$I = k \cdot U^{nB} , \quad (2.7.)$$

где  $I$  - ток разряда;

$k$  - коэффициент пропорциональности;

$n$  - показатель, зависящий от эффективности улавливания электронов;  
( $n = 5 \div 9$ )

$B$  - индукция магнитного поля.

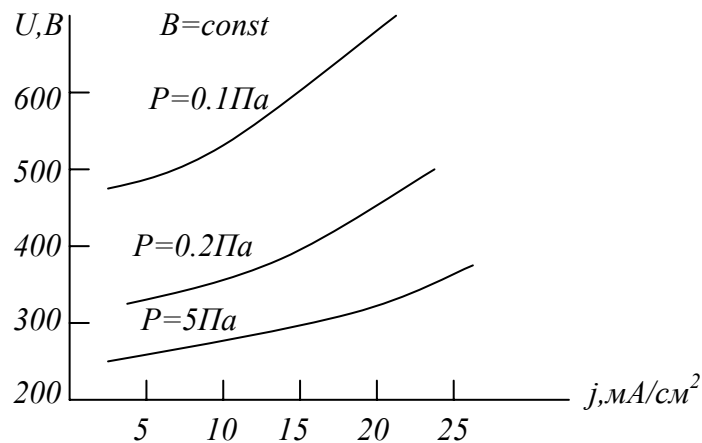


Рисунок 2.4 - Зависимость напряжения разряда от плотности тока для различных давлений

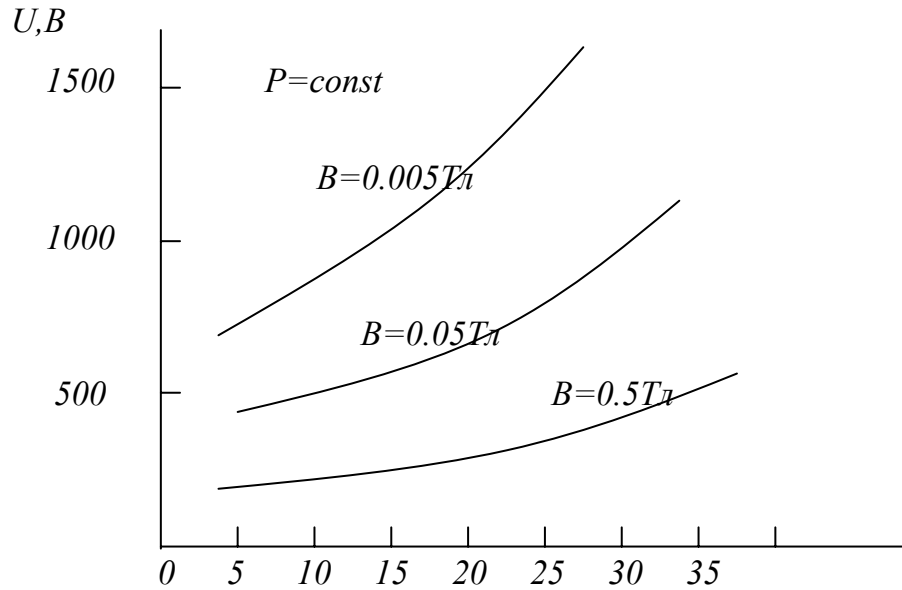


Рисунок 2.5 - Зависимость напряжения разряда от плотности тока для различной индукции магнитного поля

Зависимость напряжения от зажигания магнитного поля магнетрона описывается уравнением

$$U = k \cdot B^S, \quad (2.8.)$$

где  $S$  - для слабых полей равно от 1 до 2;  
 $S$  - для сильных полей – от 0.3 до 0.5;

Наложение магнитного поля увеличивает длину траектории электрона и увеличивает столкновения, заканчивающиеся ионизацией. Это эквивалентно увеличению давления. Эквивалентное давление определяется соотношением (2.9.)

$$P_{\text{э}} = P_0 \cdot \left[ 1 + (w_e \cdot \tau_e)^2 \right]^{1/2}, \quad (2.9.)$$

где  $P_0$  - рабочее давление в отсутствие магнитного поля;  
 $\tau_e$  - время между столкновениями электронов с частицами газа;

$$w_e - \text{циклотронная частота, } w_e = \frac{z \cdot \bar{e} \cdot B}{m},$$

где  $z$  - кратность заряда;  
 $m$  - масса частицы;  
 $\bar{e}$  - заряд электрона.

Таким образом видно, что магнитное поле влияет, когда  $w_e \cdot \tau_e \gg 1$ .

## 2.6 Особенности конденсации ионнораспыленных атомов

При магнетронном распылении материалов проявляется ряд характерных особенностей, оказывающих влияние на весь ход протекания процесса. При горении разряда происходит десорбция газа с поверхности, что влияет на состав остаточной атмосферы и вольт-амперные характеристики разряда. Существует пороговая энергия, ниже которой распыление материала не происходит. Энергия ионнораспыленных атомов на один-два порядка больше энергии термически распыленных материалов. С ростом энергии (до 3 кВ) коэффициент распыления возрастает (рис.2.6), а затем уменьшается, ввиду проникновения ионов вглубь материала. Коэффициент распыления пропорционален массе иона и не зависит от температуры вплоть до температуры плавления (при температуре плавления нарастают процессы термоионного осаждения пленок).

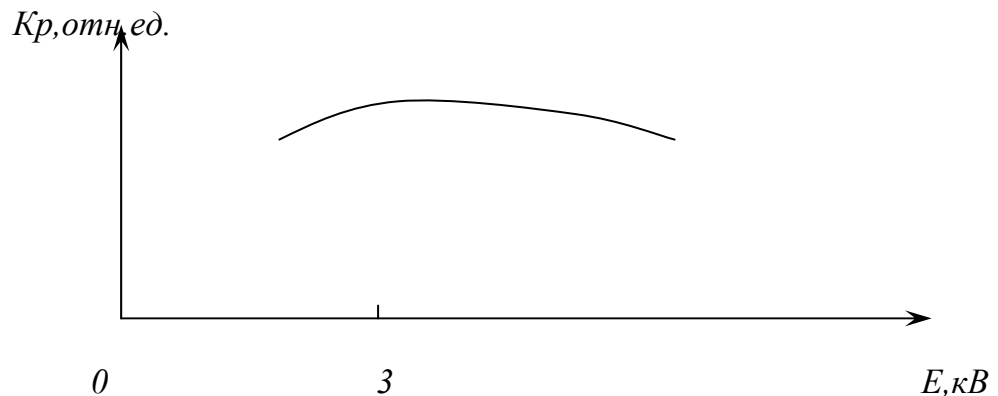


Рисунок 2.6 - Зависимость коэффициента распыления от роста энергии

Существует оптимальное расстояние между катодом и подложкой, при котором распыление максимально. Распыление в положительном столбе разряда почти не происходит.

Нагрузочная характеристика для ионного распыления материалов приведена на рис.2.7.

В потоке распыляемого материала в большом количестве присутствуют нейтралы и ионы распыляемых веществ, а также ионы рабочего газа. В результате ионного распыления в подложке присутствует большое количество газа.

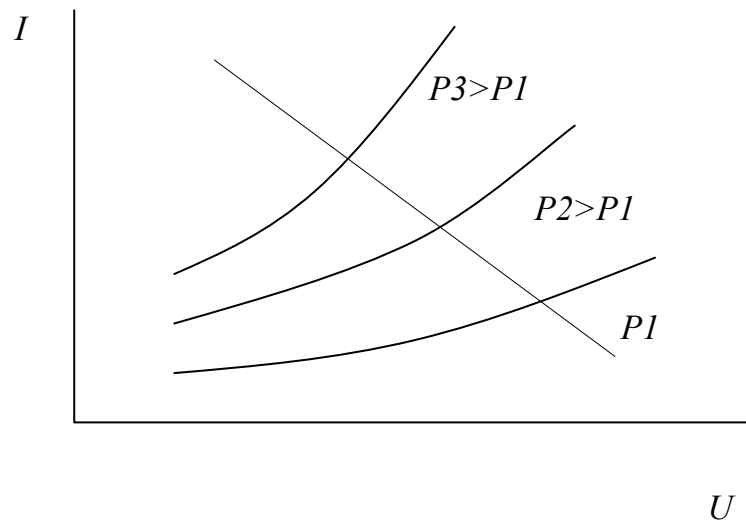


Рисунок 2.7 - Нагрузочная характеристика распыления материалов в разряде

Скорость осаждения пленок является результирующим эффектом многих факторов: давления, материала, мощности разряда, угловых параметров и т.д. С повышением плотности тока наряду с ростом распыления мишени возрастает процесс распыления подложки, что связано с перераспределением доли ионизованных и нейтральных атомов. В частности с уменьшением расстояния скорость осаждения пленки возрастает, однако возрастает и неравномерность покрытия. Для улучшения равномерности применяются либо системы перемещения подложек (планетарные системы), либо изготавливаются профилированные мишени магнетронов. В ряде случаев применяются системы с механическим или электрическим сканированием магнитного поля, профилированные экраны.

Скорость осаждения пленки при мощности разряда  $4 \text{ кВт}$  и диаметре мишени  $150 \text{ мм}$ , давлении  $10^{-1} \text{ Па}$  и расстоянии до подложки  $60 \text{ мм}$ , по данным / I /, представлена в табл.2.1.

Таблица 2.1 – Скорость осаждения пленок

Материал	Si	Ti	Ta	W	Nb	Mo	Al	Cr	Cu	Ag
Скорость, $\text{нм}\cdot\text{с}^{-1}$	7	8	8	8	8.5	12	13	17	30	44

При осаждении подложка может нагреваться из-за конденсации распыленных атомов (энергия конденсации  $8\text{-}9 \text{ эВ}\cdot\text{атом}^{-1}$ ), из-за кинетической энергии атомов ( $5\text{-}20 \text{ эВ}\cdot\text{атом}^{-1}$ ), из-за излучения плазмы ( $2\text{-}10 \text{ эВ}\cdot\text{атом}^{-1}$ ).

Скорость распыления определяется выражением:

$$v_p = 6.25 \cdot 10^{27} \cdot K_{об} \cdot j_i, \quad (2.10.)$$

где  $v_p$  - скорость распыления;

$K_{об}$  - коэффициент объемного распыления;

$j_i$  - плотность ионного тока.

Для увеличения скорости распыления в ряде случаев увеличивают магнитное поле (например, путем изготовления прорезей в мишени для уменьшения магнитного сопротивления материала). На рис.2.8. представлена зависимость коэффициента распыления от давления.

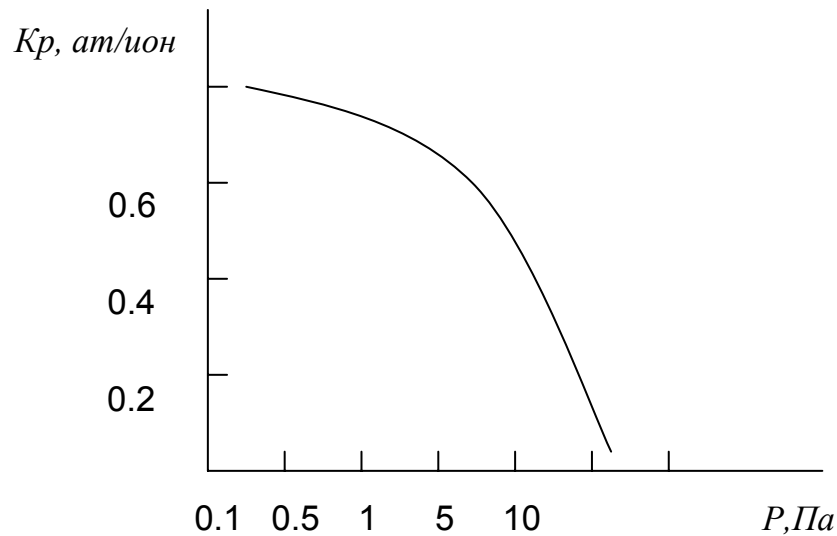
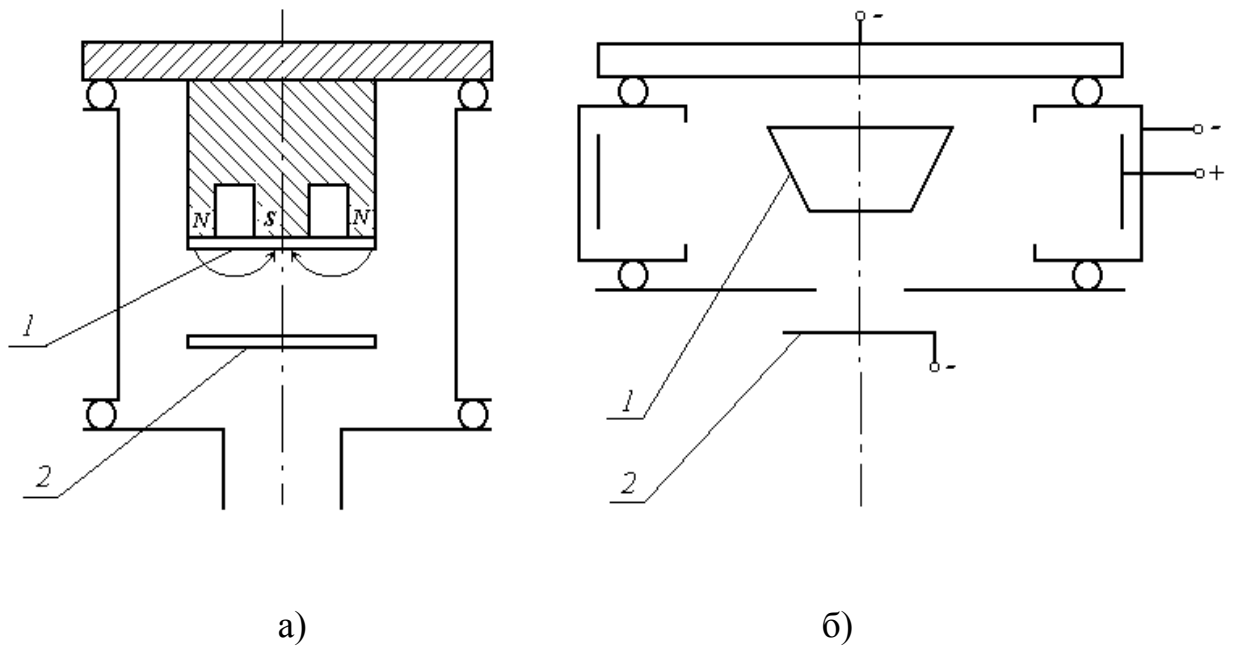


Рисунок 2.8- Зависимость коэффициента распыления от давления

## 2.7 Конструктивные схемы магнетронных систем

Различают планарные (плоские), планетарные (с вращающимися подложками), коаксиальные (осесимметричные) магнетронные системы (рис.2.9.а). Значительную группу составляют магнетронные системы с автономными ионными источниками (рис.2.9.б). Такие системы могут иметь несколько подвижных подложек, что увеличивает равномерность покрытий, а также подвижные катоды для управления вольт-амперной характеристикой устройства. В последнее время стали известны магнетронные системы с вспомогательными электродами, с профилированными мишенями, дополнительными магнитами. Дальнейшее развитие магнетронных распылителей привело к созданию систем, монтируемых в водоохлаждаемых держателях, что предотвращает внесение загрязнений в рабочую камеру, а также реализует более высокие плотности тока. Это позволяет достичь скоростей осаждения соизмеримых с термическим осаждением в высоком вакууме.



1 – мишень, 2 – подложка.

Рисунок 2.9 - Схемы магнетронных систем

При работе магнетронных систем наблюдаются следующие особенности:

1) при высоком давлении путь ионов до подложки больше длины свободного пробега молекул. Энергия осаждаемого материала уменьшается. Соударения в газе возрастают, равномерность наносимой пленки и степень ее загрязненности газом возрастает;

2) при недостаточном магнитном поле возможен поток электронов на подложку, способствующих ее нагреву;

3) распределение толщины пленки по подложке зависит от распределения плотности тока по мишени, давления газа и расстояния до подложки.

## 2.8 Геометрические параметры магнетронных систем

Наличие электрического и магнитного полей обеспечивает траектории электронов, близкие к циклоиде. Основное ускорение электронов происходит на длине катодного падения потенциала  $d_k$ , где сосредоточена значительная часть напряжения разряда. На рис.2.10. представлено распределение потенциала в магнетронной системе при различных значениях индукции магнитного поля.

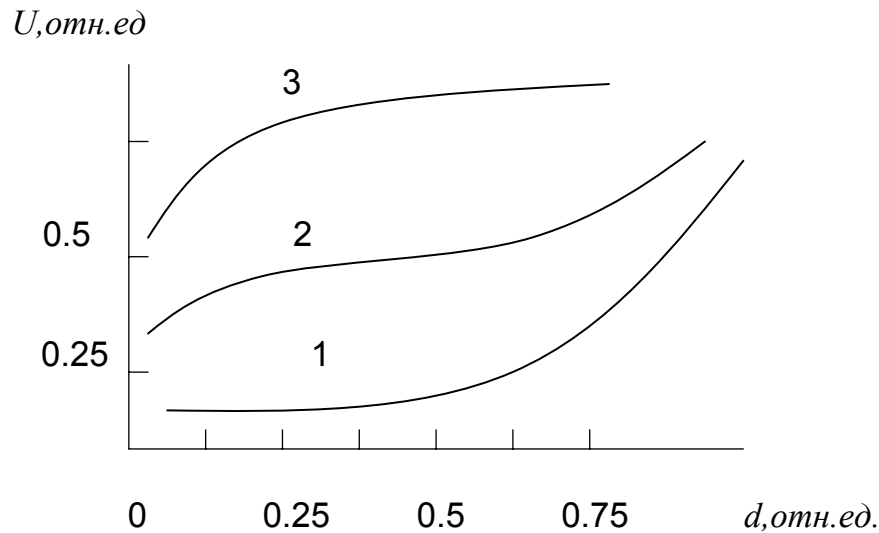


Рисунок 2.10 - Распределение потенциала в магнетронной системе

Кривая 1 – соответствует большим значениям магнитного поля, при которых происходит формирование прианодного пространственного заряда; кривая 2 – соответствует существованию обеих областей (случай обеспечения равномерного нанесения покрытия на подложку); кривая 3 – соответствует формированию положительного заряда у катода.

Наличие электрического и магнитного полей обеспечивает траекторию электронов близкую к циклоиде. Длину катодного падения потенциала можно найти из формулы:

$$d_K = 4.7 \cdot 10^{11} \cdot U_K^{3/4} / (m_i j_i^2)^{1/4}, \quad (2.11.)$$

$$d_K = 2.61 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{U_K / B_K},$$

где  $m_i$  - масса иона;

$j_i$  - плотность ионного тока на катоде;

$B_K$  - индукция магнитного поля в катодном падении.

Электрон, получив энергию в катодном падении, движется далее по ларморовской окружности.

При этом

$$v_{\perp} = (2eU/m_e)^{1/2}, \quad (2.12.)$$

скорость дрейфа частицы

$$v_H = E/B. \quad (2.13.)$$

Анод магнетронной системы должен располагаться от центра зоны распыления на расстоянии не менее  $x_0$  (для предотвращения захвата электронов из магнитной ловушки)



$$x_0 = 2m_e EU / W_0 B^2 \approx 2.25 \cdot 10^{-7} U_P \sqrt{U} / B, \quad (2.14.)$$

где  $W_0$  - суммарная энергия ионизации одного атома.

Для аргона  $W_0 = 4.8 \cdot 10^{-18}$  Дж · ион<sup>-1</sup>.

Средняя энергия ионов в магнетронной системе

$$W_i = 0.7 \cdot eU_P.$$

Радиус условной цилиндрической поверхности анода  $R_0$  вычисляется по формуле

$$R_0 = x_0 \cdot \frac{(n^2 + 1)}{2}, \quad (2.15.)$$

где  $n$  - половина ширины зоны распыления;

$$n = \frac{\ell}{x_0}.$$

### 3 Экспериментальная часть

#### 3.1 Вакуумное оборудование

Лабораторная работа выполняется на установке типа УВН-2М. Вакуумная схема установки приведена на рис.3.1. Насосная группа установки включает высоковакуумный диффузионный (паромаслянный) насос Н-2Т и насос предварительного разряжения (форвакуумный насос) типа 2НВР-5ДМ. Вакуумная система снабжена рядом манометрических преобразователей давления, позволяющих измерять давление на входе и выходе диффузионного насоса и на входе насоса предварительного разряжения. Для измерения потока газа, вводимого в насос в ходе эксперимента, служит измерительная бюретка. В качестве измерительного колпака используется рабочая вакуумная камера установки с объемом 120 л. Регулировка потока газа осуществляется с помощью игольчатого натекателя.

Вращательный насос NL1 (2НВР-5ДМ) при помощи клапанов VP2 и VP2 может быть подключен либо к измерительному колпаку С, либо к диффузионному насосу ND1 (Н-2Т) для создания необходимого предварительного разряжения в объеме насоса (ниже критического для насоса Н-2Т). При работе только вращательного насоса NL1 давления в различных точках вакуумной системы измеряются с помощью термопарных манометрических преобразователей.

Напуск атмосферного воздуха в остановленный вращательный насос производится с помощью натекателя VE1 с электромагнитным приводом.

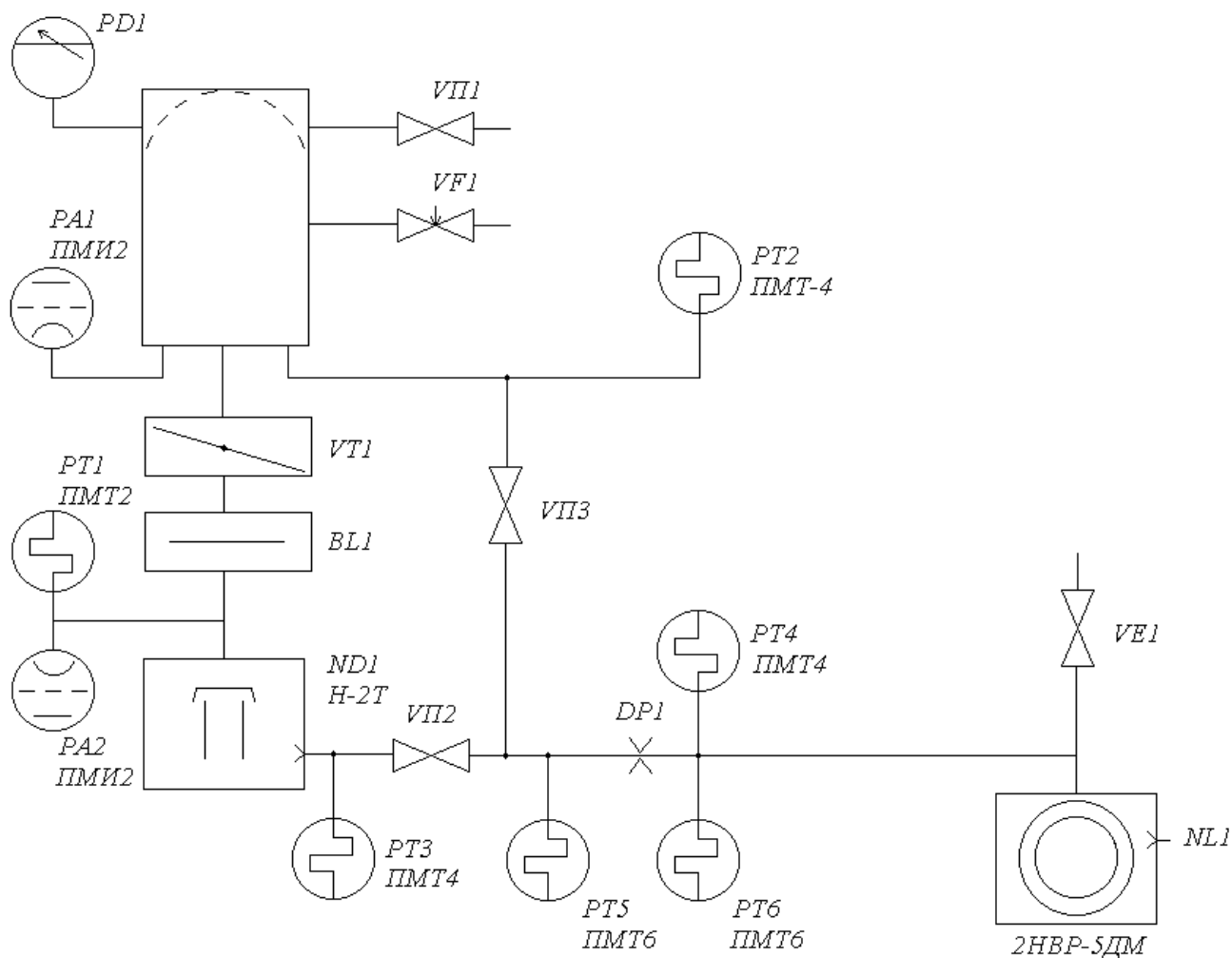


Рисунок 3.1 - Вакуумная схема установки УВН-2М

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

### 3.2 Электронное оборудование

На рис.3.2. представлена схема питания магнетрона и его принципиальная конструкция. Магнетрон собран на базе кольцевого магнита, центральный осесимметричный сердечник выполнен из электротехнической стали и служит для замыкания магнитного поля от центра к периферии мишени.

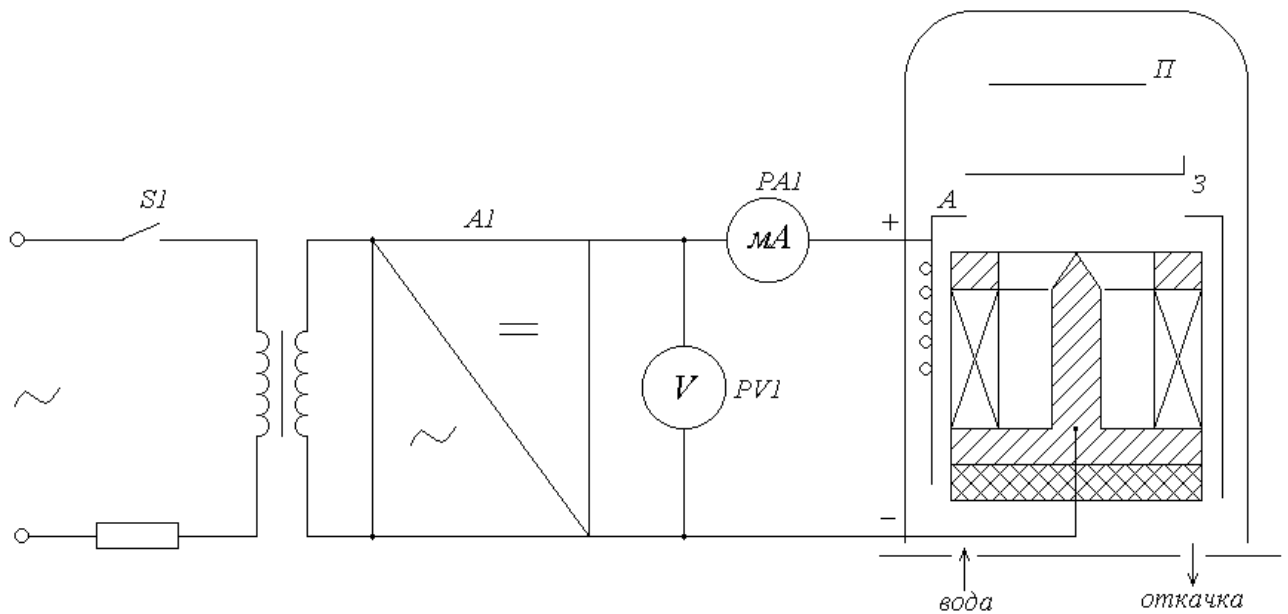


Рисунок 3.2 - Схема питания магнетрона

Анод (А) магнетрона выполнен из меди и имеет водяную рубашку. Мишень М выполнена из меди и помещена на магните. На мишень могут помещаться диски из различных материалов (свинец, алюминий, молибден и др.), либо их комбинация. Перед стеклянной подложкой  $\Pi$  помещается заслонка  $\text{З}$ , предотвращающая попадание продуктов поверхностных загрязнений на подложку. Магнетрон помещен под колпак распылительной установки. Напряжение зажигания исследуемого магнетрона составляет 400-600 В., ток разряда не превышает 80 мА. Рабочее давление 1-5 Па. Регулятор напряжения разряда находится на стойке управления. Приборы для измерения тока и напряжения находятся относительно “земли” под высоким потенциалом и помещены за прозрачным диэлектрическим экраном в верхней части стойки управления.

### 3.3 Порядок выполнения работы и методические указания

3.3.1. Работа проводится на основании плана эксперимента, предварительно составленного студентом и обсужденного с преподавателем на предмет технической возможности проверки гипотез и моделирования процесса на ЭВМ. В эксперимент могут входить:

- 1) определение вольт-амперных характеристик магнетрона на различных газах, при различной геометрии и форме электродов;
- 2) напыление различных материалов на подложки, исследование равномерности нанесения, адгезии и т.д.;
- 3) исследование условий подавления вторичных электронов;
- 4) исследование возможностей стравливания покрытий и т.д.

3.3.2. Перед работой рекомендуется ознакомиться с вакуумной системой установки, диапазоном работы датчиков и насосов, корректировкой показаний под род газа, порядком промывки вакуумной системы рабочим газом, составить таблицу; в таблице указать что нужно снимать и в какое время поднять колпак установки. Измерить геометрические размеры разрядной системы магнетрона. Сравнить данные расчета геометрических параметров с реальными.

3.3.3. Очистить подложку, установить ее над магнетроном, зафиксировать расстояние до подложки. Опустить колпак.

3.3.4. Закрыть все вентили, натекатели, проверить все ли тумблеры выключены. Включить форвакуумный насос. Если работа проводится на форвакууме (до 1 Па), то используется только обводная система установки.

3.3.5. Включить водяное охлаждение установки, после чего тумблер КОЛПАК перевести в положение ВКЛ. При этом загорится индикатор ХОЛОДНАЯ ВОДА. Прохождение воды через магнетрон контролируется визуально.

3.3.6. Промыть вакуумную систему установки рабочим газом (не менее трех раз). Для чего откачать рабочую камеру до давления 5 Па и напустить порцию рабочего газа до давления 1 мм.рт.ст. Затем откачать рабочую камеру до 5 па и повторить напуск газа.

3.3.7. Установить расход газа, соответствующий давлению 5 Па ( $30 \text{ см}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ ) и дать системе прийти в равновесие по расходу газа в течение 5 мин.

3.3.8. Прогреть подложку до 200-250 °С (стекло) в течение 5 мин., переведя тумблер ИСПАРИТЕЛЬ-НАГРЕВАТЕЛЬ в положение НАГРЕВАТЕЛЬ. Установить ток не более 5-7 А.

3.3.9. включить тумблер СЕТЬ на стойке управления. В верхней части пульта обозначится индикация трех фаз питающей сети. Включить тумблер НАПЯЖЕНИЕ РАЗРЯДА. Регулировкой напряжения разряда плавно поднять напряжение (не более 800 В.) и установить ток разряда на уровне 20 мА. Дать системе прогреться в течение 5 мин.

3.3.10. По истечении 5 мин. нажать кнопку ЗАСЛОНКА, повысить ток до 75 мА и засечь время. Напыление проводить 30-40 мин. Режим напыления контролируется визуально через окно вакуумной камеры.

**ВНИМАНИЕ.** Процессы промывки, натекания газа, газоотделения носят инерционный характер. Во избежании аварийных ситуаций категорически запрещается оставлять рабочую установку без присмотра.

3.3.11. Выключение установки производится в обратном порядке. Снимается высокое напряжение, закрываются все вентили, выключается вода. Система должна остыть в вакууме 5-10 мин. для предотвращения окисления горячей подложки и элементов магнетрона. Затем выключается форвакуумный насос, в него напускают воздух. В колпак тоже напускают воздух.

### 3.4 Вопросы для самопроверки

- 3.4.1. Достоинства и недостатки магнетронного распыления.
- 3.4.2. Проанализируйте механизмы распыления.
- 3.4.3. Принцип работы магнетронной распылительной системы.
- 3.4.4. Какова конструкция магнетрона и какова его схема?
- 3.4.5. Как расположены линии электрического и магнитного поля в магнетроне?
- 3.4.6. Какова траектория электронов и ионов в магнетроне?
- 3.4.7. Что такое ларморовский радиус?
- 3.4.8. Каковы основные параметры магнетронных систем?
- 3.4.9. Проанализируйте пути снижения загрязнения пленки газовыми включениями.
- 3.4.10. Каковы пути повышения скорости осаждения пленки?
- 3.4.11. Что такое коэффициент распыления, от чего он зависит?
- 3.4.12. Приведите несколько вариантов улучшения равномерности нанесения пленок.
- 3.4.13. Влияние рода газа на распыление.
- 3.4.14. Почему в начальный период распыления рекомендуется закрывать подложку заслонкой?
- 3.4.15. Приведите схему питания магнетрона.
- 3.4.16. Каков диапазон работы используемого в эксперименте оборудования (насосы, датчики давления)?
- 3.4.17. Какие марки напылительных установок с магнетронными источниками вам известны?
- 3.4.18. Как рассчитать геометрические параметры магнетрона?
- 3.4.19. Методы оценки адгезии пленки.
- 3.4.20. Какова аппаратура для оценки скорости нанесения и толщины пленки?

### 3.5 Содержание отчета

- 3.5.1. Привести вакуумную схему установки.
- 3.5.2. Охарактеризовать достоинства и недостатки магнетронного распыления материала.
- 3.5.3. Привести конструкцию магнетрона, на котором происходит распыление.
- 3.5.4. Рассчитать вольт-амперные характеристики:
  - а) на воздухе;
  - б) на азоте.
- 3.5.5. Привести график распределения толщины пленки по подложке, а также расчеты скорости напыления.
- 3.5.6. Оценить адгезию пленки и капельной фракции.
- 3.5.7. Произвести экспериментально-поисковые результаты, по согласованию с преподавателем.

3.5.8. Снять зависимость напряжения разряда от плотности тока на катоде для различных давлений газа.

3.5.9. Рассчитать условное положение анода (расстояние между катодом и анодом).

3.5.10. Определить величину коэффициента объемного распыления, исходя из скорости нанесения пленки, ларморовский радиус.

#### **4 Рекомендуемая литература**

1. Данилина Т.И. Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы микро- и нанотехнологии: учебное пособие / Томск, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2005.– 316 с., ISBN 5-86889-244-5

2. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: методические указания к лабораторным работам. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. – 79 с.

3. Орликов Л.Н. Технология материалов и изделий электронной техники: Методическое пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2009. – 400 с.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование процесса нанесения пленок  
магнетронным способом

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