

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

Кафедра электронных приборов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания к лабораторным работам
для студентов
направления 11.04.04 – Электроника и наноэлектроника
и направления 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика

Орликов, Леонид Николаевич.

Исследование процессов ионной обработки материалов и ионно-плазменного распыления материалов: методические указания к лабораторным работам для студентов направления 11.04.04 – Электроника и наноэлектроника и направления 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика / Л. Н. Орликов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Кафедра электронных приборов. - Томск: ТУСУР, 2019. - 32 с.

Целью данных лабораторных работ является изучение процесса ионной обработки материалов, выяснение механизма ионного травления, расчеты параметров ионного травления; детальное рассмотрение триодной системы ИПР с целью изучения ее принципа конструирования, электрофизических характеристик.

Предназначено для студентов очной и заочной форм, обучающихся по направлению 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника» по дисциплине «Процессы лазерной и электронно-ионной обработки» и направления 12.04.03 – «Фотоника и оптоинформатика» по дисциплине «Лазерные и электронно-ионные технологии фотоники».

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

Кафедра электронных приборов

УТВЕРЖДАЮ
Зав.кафедрой ЭП
_____ С.М. Шандаров
« ____ » _____ 2019 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
И ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Методические указания к лабораторным работам
для студентов
направления 11.04.04 – Электроника и наноэлектроника
и направления 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика

Разработчик

д-р техн. наук, проф.каф.ЭП
_____ Л.Н.Орликов
« ____ » _____ 2019 г

Содержание

Лабораторная работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ	5
1 Введение.....	5
2 Теоретическая часть.....	5
2.1. Модели ионного распыления	5
2.2 Эффективность ионного распыления	6
2.3 Скорость распыления материалов	9
2.4 Влияние рода газа на травление.....	9
2.5 Скорость осаждения пленок при ионном распылении	10
2.6 Вольт-амперная характеристика газоразрядного устройства для обработки материалов	10
2.7 Контрольные вопросы.....	11
3 Экспериментальная часть.....	12
3.1 Вакуумное оборудование.....	12
3.2 Электронное оборудование	13
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания	14
3.4 Вопросы для самопроверки	15
3.5 Содержание отчета	16
Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ	17
1 Введение.....	17
2 Теоретическая часть.....	17
2.1 Плазма и ее свойства	17
2.2 Ионизация газов.....	19
2.3 Ионно-плазменное распыление.....	20
2.4 Основные требования к оборудованию для ионно-плазменного распыления	22
2.5 Электрофизические параметры систем ионно-плазменного распыления	23
2.6 Контрольные вопросы.....	25
3 Экспериментальная часть.....	25
3.1 Задание на работу	25
3.2 Описание лабораторной установки	26
3.2.1 Устройство триодной системы ИПР	26
3.2.2 Вакуумная система установки	27
3.3 Порядок выполнения работы и методические указания	28
3.4 Содержание отчета	30
Рекомендуемая литература	30

Лабораторная работа 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

1 Введение

В науке и технике известны многочисленные применения ионной обработки поверхности; ее используют для ионной очистки получения атомно-чистой поверхности, для ионной полировки, для травления материалов и т.д. Этот процесс играет важную роль в технологии получения современных электронных приборов с новыми функциональными свойствами.

Целью данной работы является изучение газоразрядного устройства на основе высоковольтного тлеющего разряда для ионной очистки полировки и травления материалов; ознакомления с основными приемами ионной обработки; получение навыков в оценке параметров проведения процесса.

2 Теоретическая часть

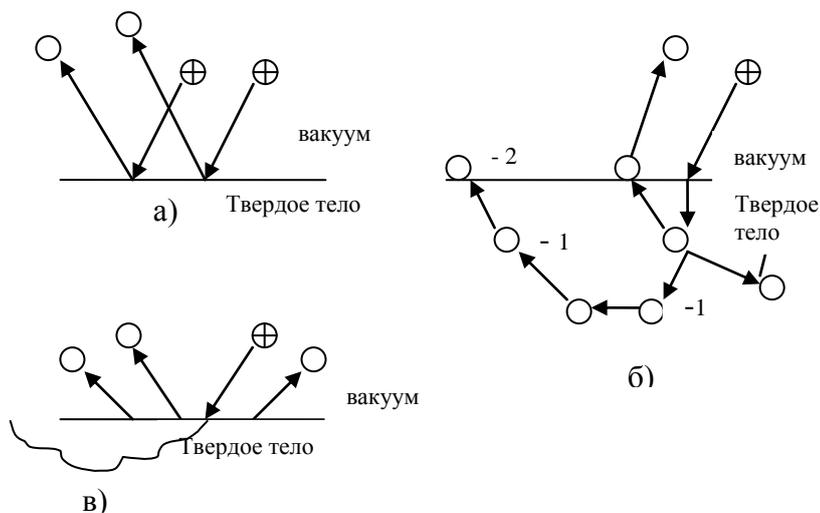
2.1. Модели ионного распыления

Удар иона об поверхность приводит к двум эффектам: эмиссии нейтральных атомов (распыление материала) и эмиссии вторичных электронов, обеспечивающих поддержание разряда. Единой теории, объясняющей механизм ионного распыления, пока нет. Наиболее удачно экспериментальные результаты по распылению объясняются с позиций импульсного механизма. Модель распыления по этой теории основана на предположении о передаче ионом своей энергии атомам твердого тела в серии последовательных столкновений и предполагает существование трех основных механизмов. Это механизм прямого выгибания атомов, механизм смещения атомов и механизм тепловых пиков. На рис.2.1 приведены схемы моделей ионного распыления.

Модель прямого выгибания атомов характерна для ионной обработки одноэлементных материалов.

Модель смещения атомов находит применение для описания процесса распыления материалов сложного состава. В этом случае более легкие атомы вещества подвержены выбиванию, а более тяжелые – смещению. Этот механизм объясняет изменение режимов в процессе травления, изменение стехиометрии состава поверхности после травления; указывает на рекомендации по выбору массы ионов, бомбардирующих поверхность.

Модель тепловых пиков объясняет процесс ионного распыления под действием термического испарения из локального пятна. Этот режим характерен для предварительно прогретых материалов, когда энергия связи невелика и не наблюдается преимущественного вылета одной компоненты.



- а) – режим прямого выбивания;
 б) – механизм смещения (1 – первично смещенные атомы; 2 – вторично смещенные);
 в) – механизм тепловых пиков.

Рисунок 2.1 - Схема моделей ионного распыления

2.2 Эффективность ионного распыления

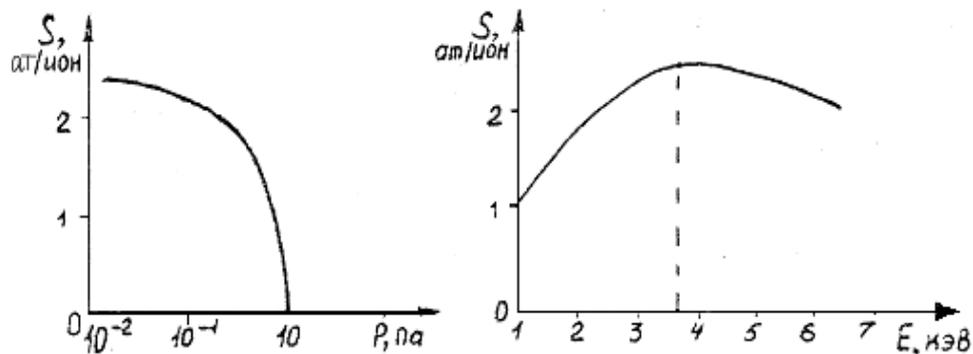
Эффективность ионного распыления η определяется массой вещества m , распыляемой в единицу времени с единицы площади, отнесенной к мощности разряда $W/3$.

$$\eta = \frac{m}{W} \quad (2.1)$$

Скорость распыления материалов в значительной степени зависит от коэффициента распыления S , равного отношению количества распыленных атомов Np к общему числу падающих ионов Nn

$$S = \frac{Np}{Nn} \quad (2.2)$$

Существенное влияние на коэффициент распыления оказывает давление и род рабочего газа, геометрия разрядной системы, состав распыляемой поверхности и ее температура, угол падения ионов и их энергия (рис 2.2).



- а) – зависимость от давления;
 б) – зависимость от энергии ионов.

Рисунок 2.2 - Зависимость коэффициента распыления от давления и энергии ионов

Уменьшение коэффициента распыления с ростом давления связано с уменьшением длины свободного пробега частиц. Чтобы удалить атом с поверхности (где на него действует половина связей) требуется энергия E_0 , вдвое превышающая энергию сублимации E_c , а для смещения атома по объему – вчетверо превышающая энергию сублимации. С ростом энергии ионов (см. рис.2.2 б) выше определенного значения коэффициент распыления уменьшается, что связано с имплантацией ионов вглубь материала.

Наиболее строгая и законченная теория катодного распыления материалов разработана Зигмундом. Согласно этой теории коэффициент распыления в области его роста от напряжения выражается следующей формулой (2.3):

$$S = \frac{3 \cdot \beta \cdot M_a \cdot M_i \cdot E}{\pi^2 \cdot (M_a + M_i)^2 \cdot 2 \cdot E_{суб}}, \quad (2.3)$$

где β - безразмерный коэффициент, зависящий от отношения массы материала и массы иона;

E - энергия иона, Дж (эВ);

$E_{суб}$ - энергия сублимации, Дж (эВ).

Зависимость параметра β от отношения масс атома и ионов приведена на рис.2.3

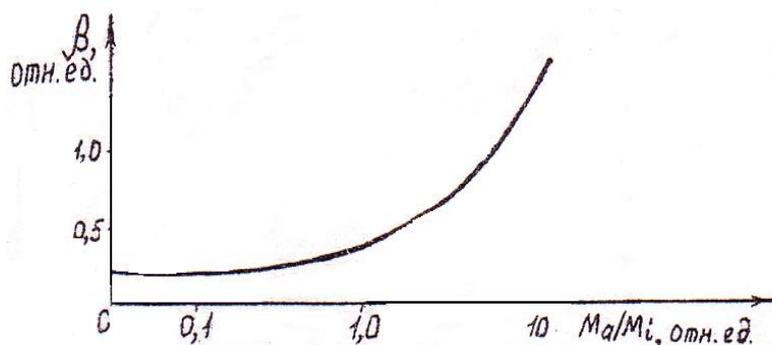


Рисунок 2.3 - Зависимость параметра β от отношения масс атома и иона

Экспериментальные величины коэффициентов распыления для ряда материалов могут существенно отличаться от расчетных. В числе причин отличия могут быть:

- окисление поверхностей в остаточной атмосфере (коэффициенты распыления окислов меньше);
- присутствие остаточных углеводородов и паров воды, при разложении которых высвобождается кислород;
- большое содержание газа в подложке, вызванное плохой очисткой поверхности; присутствие в распыляемом потоке нейтралей.

В табл.2.1 приведены некоторые величины, характеризующие распыление материалов ионами аргона.

Таблица 2.1 – Величины, характеризующие распыление материалов ионами аргона

Элемент	Атомная масса, M_2	Энергия сублимации, $E_{суб}$, эВ	Коэффициент распыления для различных энергий (бомбардировка аргоном)		Плотность атомов мишени $N_o = 10^{-22}$	Коэффициент ионно-электронной эмиссии
			E=2 кэВ	E=5кэВ		
Al	27,0	3,3	1,45	1,7	6,04	10,0
Ti	48,0	4,3	1,50	1,8	5,60	3,2
Cu	63,5	3,5	2,10	2,6	8,52	6,0
Nb	92,0	7,5	1,10	1,5	5,45	5,1
W	184,0	8,7	1,40	2,0	6,09	2,4

2.3 Скорость распыления материалов

Скорость распыления (травления) материала V_{mp} определяется как отношение глубины распыляемого (или стравливаемого) материала h к времени распыления t :

$$V_{mp} = h/t \quad (2.4)$$

Для расчета этой величины необходимо знать плотность ионного тока j в сечении, перпендикулярном направлению падения ионов. В [4] выражение для скорости травления имеет вид

$$V_{mp} = 6.25 \cdot 10^{25} \cdot j \cdot S \cdot M_2 / N_a \cdot \rho, \quad (2.5)$$

где M_2 - атомная масса распыляемого материала, г/моль;
 N_a - Число Авогадро.

2.4 Влияние рода газа на травление

Род газа неоднозначно влияет на параметры процесса. Так легко газы (гелий) способствует более ровному профилю поверхности, но меньшей скорости обработки. Аргон относительно дешев, но не всегда предпочтителен при обработке многокомпонентных материалов, в виду нарушения приповерхностного состава. Кислород вызывает образование окислов и резкое уменьшение скорости обработки. Азот при определенной температуре вступает в реакцию с поверхностью. Считается, что галогены типа хлора и фтора активизируют поверхность и способствуют образованию легко распыляемых компонентов, но токсичны и вредно влияют на материалы вакуумной установки.

Величина ускоряющего напряжения для перехода в режим ионного травления для различных газов должна удовлетворять условию:

$$U = C \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{M}{m} \cdot U_i,$$

где C - константа системы ($4 \cdot 10^3$);
 M, m – масса материала и иона;
 U_i - потенциал ионизации газа.

Минимальное ускоряющее напряжение, при котором возможен переход, в режим травления для водорода составит 6,9 кВ, для кислорода – 17 кВ.

Расход газа оказывает существенное влияние на травление материалов. При обработке материалов происходит их нагрев, сопровождаемый выделением газов (чаще это молекулы воды, углекислого газа и углеродов). Сорбируются на холодных местах ил вертикальных стенах, пленки этих веществ меняют профиль травления, вызывают

поверхностные пробои. Коэффициент распыления таких пленок много меньше коэффициента распыления основного материала.

Подача газа способствует уменьшению концентрации вредных примесей и поддерживают долю ионов, активно участвующих в процессе перезарядки (для ионов кислорода она составляет около 50 %).

2.5 Скорость осаждения пленок при ионном распылении

При расчете скорости осаждения нужно учитывать расстояние от мишени до подложки, скорость распыления, размер электродов. Для параллельно расположенных электродов получена формула:

$$V_{oc} = V_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \frac{r_k^2 - h^2 - r_n^2}{\left[r_k^4 + 2 \cdot (h^2 - r_n^2) \cdot r_k^2 + (h^2 + r_n^2)^2 \right]^{1/2}} \right\}, \quad (2.7)$$

где V_p - скорость распыления, м/с;

r_k - радиус катода, м;

h - расстояние между мишенью и подложкой, м;

r_n - радиус подложки, м.

При осаждении пленок играет роль отношение длины свободного пробега частиц распыленного материала L_a при давлении P_a к расстоянию до подложки d .

В таблице 2.2 приведены значения пробегов для различных материалов.

Таблица 2.2 - Значение пробегов для различных материалов

Материал	Cu	Mo	W	Fe
$L_a \cdot 10^{-2}$ Па/м	2,13	3,58	3,95	2,54

Например, при расстоянии до подложки 70 мм необходимо обеспечить давление менее 0,3 Па.

2.6 Вольт-амперная характеристика газоразрядного устройства для обработки материалов

Условие горения разряда в устройстве подчиняется закону Пашена. Наиболее интенсивно процесс травления происходит при бомбардировке поверхности высокоэнергетичными частицами, что соответствует левой ветви кривой Пашена. При этом на вольт-амперной характеристике с увеличением напряжения наблюдается увеличение тока разряда.

Для процессов очистки или ионной полировки более важна плотность тока. При этом предпочтительна Вольт-амперная

характеристика, вблизи минимума кривой левой ветви. Увеличение давления газа при постоянном расстоянии между электродами вызывает увеличение вероятности диссоциации молекул и образование промежуточных соединений. Уменьшение давления вызывает рост доли быстрых электронов в разряде.

В первом приближении уравнение баланса мощности в разряде можно представить уравнением (2.8).

$$P = U \cdot I = \int_s j_e \cdot \left(\frac{2_k T_e}{e} + \varphi_0 \right) ds + \int_s j_i \cdot \left(\frac{2_k T_i}{e} + U_i - \varphi_0 \right) ds + P_{изл} \quad (2.8)$$

где φ_0 - работа выхода электрона;

U_i - потенциал ионизации газа.

Пренебрегая мощностью на излучение, при $n_e \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$, U_p до 30 кВ в разряде имеют место соотношения:

$$I_e \approx 35 \% \text{ от } I_p; \quad \frac{I_e}{I_i} \approx 8 \div 10 = \gamma,$$

где γ является функцией материала (значение γ приведено в таблице 2.1); $T_e \approx 4,5 \cdot 10^4 \text{ К}$.

2.7 Контрольные вопросы

2.7.1. Какие теоретические модели описывают процессы ионного распыления?

2.7.2. Как зависит коэффициент распыления от давления и энергии ионов? Как его рассчитать?

2.7.3. Какие явления на поверхности вещества сопровождают процесс ионного распыления?

2.7.4. От каких параметров зависит скорость травления материалов?

2.7.5. Как влияет род газа на процесс травления?

2.7.6. Как влияет напряжение и ток разряда на обеспечение режима очистки или режима травления поверхности?

2.7.7. Как влияет “масляный” и “безмасляный” вакуум на профиль травления?

2.7.8. От чего зависит скорость осаждения ионно-распыленных пленок?

2.7.9. На кривой Пашена охарактеризуйте области, приемлемые для ионной полировки, очистки и для травления материалов.

2.7.10. Соотношение долей ионного и электронного тока в разряде.

2.7.11. В чем заключается селективность и изотропность ионного травления?

2.7.12. Охарактеризуйте ионно-плазменное, ионно-лучевое, плазмо-химическое ионное травление материалов.

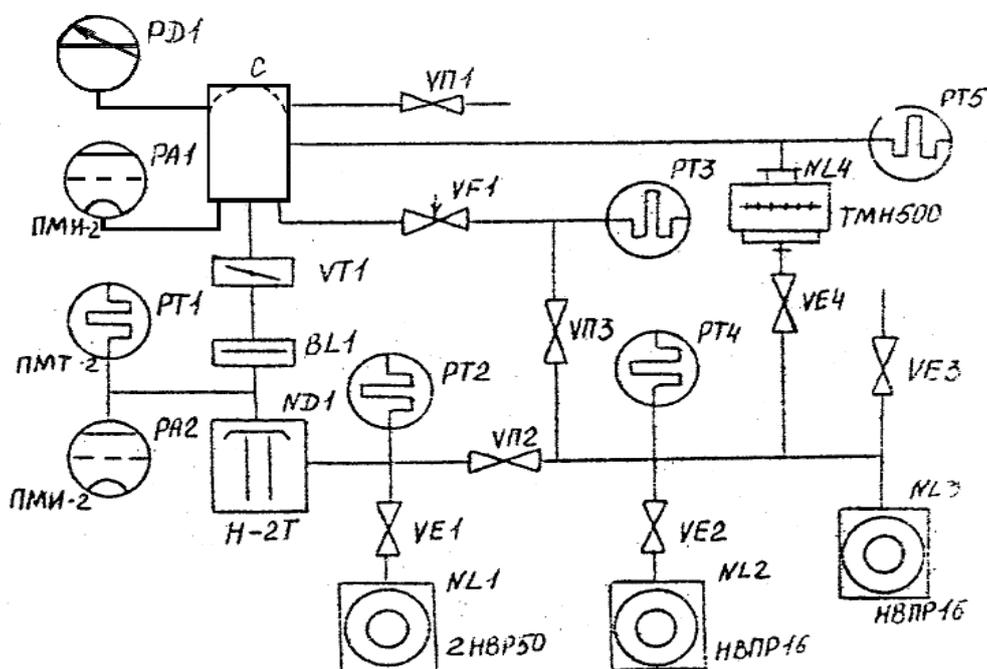
3 Экспериментальная часть

Для выполнения работы используется следующее вакуумное и электронное оборудование:

- 1) вакуумный агрегат установки А-306.05;
- 2) вакуумметрическая аппаратура;
- 3) источник высокого напряжения ПУР-5/50;
- 4) источник ионов.

3.1 Вакуумное оборудование

Схема вакуумной системы приведена на рис.3.1.



ND1, NL1-ND4 – вакуумнасосы; PD1, PA1, PA2, PT1-PT5 – датчики давления; BL – ловушка; VП1-VП3, VT1, VE1-VE4 – вентили.

Рисунок 3.1 - Схема вакуумной системы

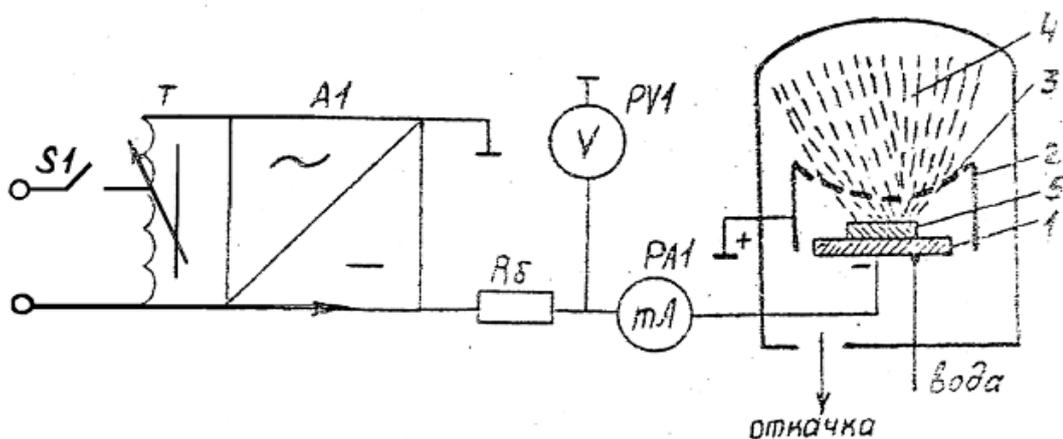
Высоковакуумная насосная группа состоит из высоковакуумного диффузионного (паромасляного) насоса Н-2Т и турбомолекулярного (безмасляного) насоса ТМН-500. Предварительное разряжение в камере и на выходе высоковакуумных насосов обеспечивается форвакуумными насосами НВРР-16 и 2НВР-5 ДМ, связанными общим вакуумпроводом. Связь вакуумных насосов позволяет сокращать время выхода установки на рабочий режим, обеспечивать согласование с высоковакуумной откачкой группой в режиме обмена газа за счет напуска и откачки, подавлять случайные течи и потоки десорбции, возникающие за счет

отражения электронов и ионов от стенок камеры. Вакуумная система снабжена рядом манометрических преобразователей давления, позволяющих оценивать давление в различных точках установки.

3.2 Электронное оборудование

Схема питания устройства для ионной обработки материалов и его принципиальная конструкция представлена на рис. 3.2. Устройство состоит из дискового катода 1 и кольцевого анода 2. Катод выполняет роль извлекающего электрода для ионов и выполнен из нержавеющей стали, имеющей низкий коэффициент распыления. Анод выполнен из алюминия и имеет большой коэффициент ионно-электронной эмиссии, что способствует генерации электронов внутри устройства и обеспечивает поддержание разряда. Устройство позволяет изменять геометрию и взаимное расположение электродов, что влияет на его вольтамперную характеристику. Таким образом, производится перестройка устройств в режим очистки, полировки или травления материала мишени, помещенной из извлекающем электроде. Анод закрывается сеткой из нержавеющей стали, что выравнивает электрическое поле и способствует выравниванию плотности тока на мишени. Охлаждение мишени проводится проточной водой через длинные резиновые шланги, что предотвращает утечку высокого напряжения в водопроводную систему.

При обеспечении давления 10⁻⁵ Па и подаче на катод 1 высокого напряжения отрицательной полярности в разрядной системе возбуждается высоковольтный тлеющий разряд, ток которого ограничивается балластным сопротивлением R_b .



- 1 – катод; 2 – анод;
3 – сетка; 4 – плазма; 5 – образец.

Рисунок 3.2 - Схема устройства для ионной обработки материалов

Основными областями разряда является область катодного падения потенциала и область плазмы. В области катодного падения потенциала

сосредоточено почти все напряжение разряда диффундирует к границе области катодного падения и ускоряются электрическим полем в направлении катода. Под действием бомбардировки с поверхности катода выбиваются частицы материала, вторичные электроны, нейтральные молекулы. Управление током разряда осуществляется посредством воздействия на плотность плазмы регулировкой давления газа. При небольшом напряжении разряда (до 20 мА) в основном происходит очистка материалов. При увеличении тока разряда увеличивается приповерхностный нагрев материала и реализуется режим ионной полировки. С течением времени (около 20 мин) приповерхностный слой окислов удаляется и разряд начинает гореть в парах распыляемого материала. Вольтамперная характеристика разряда при этом меняется (увеличивается напряжение, уменьшается ток), что свидетельствует о начале интенсивного травления материала.

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 вольтамперной характеристики на различных газах, при различной форме электродов и различном их взаимном расположении;
- 2) ионная полировка материалов;
- 3) исследование равномерности травливания различных пленок;
- 4) оценка профиля травления в “масляном” и “безмасляном” вакууме.

3.3.2. Перед работой рекомендуется ознакомиться с вакуумной схемой установки, диапазоном работы датчиков и откачного оборудования; осмотреть конструкцию источников ионов для обработки материалов и измерить его размеры; провести теоретические расчеты ожидаемого коэффициента распыления; составить схему технологического цикла.

3.3.3. Очистить подложки (не менее четырех), измерить толщину пленки, установить подложки в источнике ионов, зафиксировать размеры, закрыть вакуумную камеру.

3.3.4. Закрыть все вентили, натекателя, проверить, все ли тумблеры выключены. Включить форвакуумный насос и через обводную систему откачать камеру до давления 10 Па.

3.3.5. Включить водяное охлаждение установки, открыть вентиль, сообщающий выход диффузионного насоса (через 50-60 мин. Насос выйдет на рабочий режим).

3.3.6. Установить расход газа, соответствующий давлению 5 Па, дать системе прийти в равновесие в течение 5 мин.

3.3.7. Подключить расходомер, измерить расход газа, соответствующий давлениям 1, 3, 7 Па.

3.3.8. Включить напряжение разряда. Снять вольтамперные характеристики при различных давлениях в камере, соответствующие началу процесса обработки. Поддерживая напряжение разряда постоянным, снять зависимость тока разряда от давления газа. Выбрать рабочий режим устройства.

3.3.9. Провести процесс обработки материала в течение 20 мин.

3.3.10. Снять вольтамперную характеристику в конце процесса.

ВНИМАНИЕ. Процессы натекания газа, процессы газоотделения носят инерционный характер. Во избежание аварийной ситуации категорически запрещается оставлять работающую установку без присмотра.

3.3.11. Выключить напряжение разряда, выключить нагреватель диффузионного насоса (он остывает 40 мин.). Закрывать все вентили, кроме откачки выхода диффузионного насоса.

3.3.12. Проверить, закрыт ли вход диффузионного насоса. Провести напуск воздуха в рабочую камеру для ее разгерметизации. Дать остыть устройству для обработки материалов.

3.3.13. Провести микроскопические исследования поверхности обработки. Оценить толщину стравливания по светопропусканию, установив образец на зеркало микроскопа МБС-10. Провести анализ профиля обработки. По микроскопу МИМ-7 провести качественные измерения профиля неровностей. Провести эллипсометрические измерения профиля поверхности.

3.3.14. Закрывать вентиль выхода диффузионного насоса. Закрывать воду, выключить форвакуумный насос и провести в него напуск газа. Сдать установку лаборанту или преподавателю. Подписать результаты предварительной обработки экспериментов у преподавателя.

3.4 Вопросы для самопроверки

3.4.1. Каковы условия, влияющие на равномерность ионного распыления?

3.4.2. Каковы схемы устройств для ионной обработки поверхностей?

3.4.3. Какие физические процессы лежат в основе ионной очистки, полировки и травления многокомпонентных материалов?

3.4.4. Как по вольтамперной характеристике определить начало травления материала?

3.4.5. Как оценить соотношение доли ионного и электронного тока в разряде?

3.4.6. Какова принципиальная схема питания ионного источника?

3.4.7. Какие физические процессы лежат в основе операций технологического цикла?

3.4.8. Как провести измерение толщины травления пленок?

3.4.9. Поясните механизмы ионного травления.

3.4.10. Каков алгоритм включения и выключения установки?

3.5 Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схему вакуумной установки с диапазоном работы оборудования;
- 2) схему ионного источника;
- 3) вольтамперные характеристики устройства при трех различных давлениях в камере (10, 5, 1 Па);
- 4) вольтамперные характеристики на рабочем давлении:
 - в начале проведения процесса;
 - в конце процесса;
- 5) зависимость расхода газа от давления в камере;
- 6) зависимость тока разряда от давления;
- 7) расчет электрофизических параметров
- 8) алгоритм включения и выключения установки;
- 9) расчет скорости осаждения распыленной пленки по теории и эксперименту;
- 10) привести последовательность технологических операций подготовки и проведения процесса травления поверхности;
- 11) против каждой операции указать оптимальные параметры ее проведения (давление, температура, время);
- 12) задаваясь минимальными и максимальными значениями рабочих режимов, построить графики изменения электрофизических величин относительно друг друга. Подготовить презентацию по исследованию;
- 13) привести эскизы и спецификацию фрагментов сертифицированных вакуумных элементов и оборудования, рекомендуемых для реализации процесса травления в производстве.

Лабораторная работа 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО РАСПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

1 Введение

Современная микроэлектроника использует методы планарной технологии для получения активных элементов полупроводниковых интегральных схем (ИС) и методы пленочной технологии для металлизации, создания пассивных элементов и гибридных ИС. Повышение точности и качества изготовления элементов ИС является наиболее характерной тенденцией развития технологии микроэлектроники. Здесь используются такие процессы: как диффузия, эпитаксия, окисление и др., среди которых особо важное место занимают процессы конденсации тонкопленочных покрытий из молекулярных потоков в вакууме.

По способу создания молекулярных пучков веществ, превращенного в парообразное состояние, существующие методы подразделяются на вакуумно-термическое испарение и ионно-плазменное распыление (ИПР).

В настоящее время наблюдается тенденция к расширению применения ионно-плазменного оборудования и методов, использующих плазму как источник ионов, бомбардирующих мишень с целью ее распыления, что позволяет решить ряд важных задач, таких как:

- 1) повышение процента выхода годных изделий;
- 2) повышение качества выпускаемой продукции;
- 3) снижение трудоемкости и экономия материалов;
- 4) получение пленок стехиометрического состава;
- 5) получение пленок тугоплавких материалов.

Задачей данной работы является детальное рассмотрение триодной системы ИПР с целью изучения ее принципа конструирования, электрофизических характеристик.

2 Теоретическая часть

2.1 Плазма и ее свойства

Плазмой называется ионизованный газ, в котором атомы (все или их значительная часть) потеряли по одному или несколько принадлежащих им электронов и превратились в положительные ионы. В этом случае можно считать, что плазма представляет собой смесь трех компонент: свободные электроны, положительные ионы и нейтральные атомы или молекулы. Основное условие существования плазмы – равенство концентрации положительно n^+ и отрицательно n^- заряженных частиц (условие квазинейтральности).

Плазму называют четвертым состоянием вещества, поскольку ее свойства существенным образом отличаются от свойств трех других состояний, плазма это:

- естественное состояние вещества, нагретого до очень высокой температуры;
- динамическая система – объект приложения электромагнитных сил;
- самое распространенное состояние материи (звезды, северное сияние, ионосфера, радиационные пояса и. д.); в лабораторных условиях плазмой является электрический разряд;
- материальная среда, где взаимодействие частиц друг с другом обеспечивается электростатическими силами.

Электрические силы, связывая разноименные заряды в плазме, обеспечивают ее квазинейтральность. Всякое разделение зарядов приводит к возникновению электрических полей, стремящихся скомпенсировать возмущение. При высокой плотности плазмы (до 10^{15} ион·см⁻³) разделение зарядов в пределах объема 1 см³ вызвало бы напряженность электрического поля $E = 10^{11}$ В·см⁻¹, что привело бы к немедленному восстановлению квазинейтральности.

В плазме частицы одного знака экранируются частицами другого знака. При этом область существования сильного электрического поля вокруг заряженной частицы ограничена сферой с радиусом δ (называемым дебаевским радиусом экранирования):

$$\delta = \sqrt{\frac{k \cdot T}{4 \cdot \pi \cdot n_- \cdot e^2}} = 7430 \cdot \sqrt{\frac{T}{n_-}}; \quad (2.1)$$

- где T – средняя температура равновесной плазмы, К;
 k – постоянная Больцмана;
 n_- – концентрация электронов в плазме, см⁻³;
 e – элементарный электрический заряд, Кл.

В общем случае в плазме различают электронную T_e и ионную T_i температуры, причем при малой или средней плотности плазмы газового разряда T_e значительно превосходит T_i , что обусловлено разницей масс электронов и ионов. Внешние источники электрического питания передают им тепловую энергию с коэффициентом, пропорциональным отношению масс. Поэтому в газовом разряде $T_e = 5-10$ эВ (50000 – 100000 К), а T_i не превышает 1эВ. Эта разница уменьшается с повышением концентрации плазмы, т.к. число столкновений растет пропорционально квадрату концентрации.

Одним из важнейших свойств плазмы является ее управляемость с помощью электрических и магнитных полей. Под действием магнитного поля плазма теряет изотропию и проявляет анизотропию проводимости вдоль и поперек магнитного поля. Заряженная частица в однородном магнитном поле движется по винтовой линии, независимо от исходных направления и скорости движения, пересекая одну и ту же силовую линию. Перемещение электронов и ионов поперек силовых линий магнитного поля возможно лишь благодаря диффузии, вызванной градиентом их концентрации и столкновениями частиц плазмы. Плазма, частицы которой

оказываются как бы замороженными в силовые линии, повторяя их направление, называется намагниченной. При этом, как правило, к намагниченному полю привязаны электроны, а ионы удерживаются в той же области пространства электрическим полем электронной компоненты плазмы.

Если в плазму ввести плоский электрод (зонд Легмюра) и подать на него отрицательный относительно плазмы потенциал, то вблизи электрода произойдет возмущение плазмы. На некотором расстоянии от электрода образуется граница плазмы, характеризующая тем, что в области между ней и электродом наблюдается поток ионов из плазмы и их ускорение. Эти ионы бомбардируют электрод и распыляют его поверхность. Вне границы плазма сохраняет свои свойства.

Плотность ионного тока, отбираемого на такой электрод (получивший название мишень в системах ионно – плазменной обработки), определяется уравнением:

$$j_i = 0,4 \cdot e \cdot n_+ \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T_e}{m_i}} = 8 \cdot 10^{-16} \cdot n_+ \cdot \sqrt{\frac{T_e}{M}} \quad (2.2)$$

где j_i – плотность ионного тока на мишень, $A \cdot m^{-2}$;

n_+ – концентрация ионов в плазме, m^{-3} ;

T_e – температура электронов в плазме, К;

M – молекулярный вес иона по отношению к водороду ($M=1$ для водорода).

Уравнение (2.2) показывает, что плотность тока не зависит от величины потенциала, приложенного к мишени, а зависит от свойств плазмы. Ток ионов является током насыщения, определяемой концентрацией плазмы, и для его изменения необходимо воздействовать на плазму, способ ее возбуждения и формирования.

2.2 Ионизация газов

В лабораторных и производственных условиях плазму возбуждают при электрическом разряде в разряженном газе.

Если в длинной стеклянной трубке с двумя плоскими электродами на концах (катод-анод) создать разряжение порядка $10^{-2} - 10^{-3}$ Па и медленно повышать разность потенциалов между электродами, можно обнаружить электрический ток в цепи порядка $10^{-12} - 10^{-6}$ А, появляющийся вследствие ионизации остаточного газа космическими частицами. Эта ионизация создает пары ион-электрон, электроны направляются на анод, а ионы – на катод; цепь замыкается и возникает темный разряд, нашедший применение в счетчиках космического излучения.

Если трубку заполнить газом при давлении порядка $10^1 - 10^2$ Па, то при прочих равных условиях ток возрастает настолько, что происходит превращение темного разряда в нормальный тлеющий разряд с характерным свечением междуэлектродного пространства. При этом

существенную роль начинают играть процессы в пространстве анод- катод, способствующие ионизации газа, что приводит к снижению падения потенциала между электродами и повышению тока в цепи. В интервале двух-трех порядков величины тока разряда ($10^{-5} - 10^{-2}$ А) наблюдается постоянное падение потенциала. Затем наступает резкое повышение напряжения и тока – это область аномального тлеющего разряда, когда увеличивается площадь катода, участвующая в разряде, и отрицательное свечение покрывает весь катод. Такой аномальный тлеющий разряд используют в диодных системах для интенсификации процессов, протекающих на катоде, и чтобы при напряжении 1 - 2 кВ получить плотность тока до $1 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$.

При дальнейшем увеличении тока (порядка 1 А) зажигается третий вид самостоятельного разряда – дуга. Дуговой разряд широко используется в плазменных источниках заряженных частиц.

2.3 Ионно-плазменное распыление

Большинство газоразрядных распылительных систем работает при давлениях порядка 1 Па (10^{-2} мм рт.ст.). При таких относительно высоких давлениях процесс распыления недостаточно эффективен, т.к. ионы имеют большую вероятность передать свой заряд нейтральным атомам, которые имеют большую вероятность отражаться без процессов распыления. Это приводит к необходимости уменьшать давление газа и повышать напряжение разряда. Чтобы поддерживать разряд при меньших давлениях газа необходимо иметь дополнительный источник электронов для повышения эффективности ионизации газа.

Схема ионно-плазменного распыления в разряде, поддерживаемом термоэмиссией, приведена на рис. 2.1

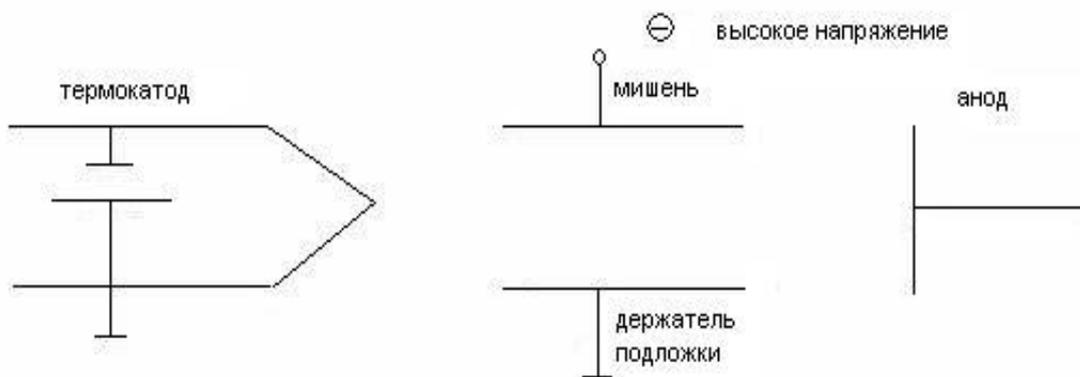


Рисунок 2.1 – Схема ионно-плазменного распыления

Принцип действия систем, использующих плазму как источник бомбардирующих поверхность ионов, основан на известном явлении

ионного распыления. Метод ионного распыления заключается в выбивании атомов распыляемого материала в результате бомбардировки мишени энергетическими ионами. При нанесении пленок методами ИПР используется взаимодействие энергетических ионов с твердым телом, в результате чего поверхностные атомы и молекулы распыляемого материала, который называется мишенью, переносятся на подложку. Процесс этот носит характер чисто физического распыления, если вероятность того, что бомбардирующий ион образует химические связи с атомами обрабатываемого материала, ничтожно мала. Для ИПР используют ионы инертных газов: *He, Ne, Ar, Kr, Xe*. Согласно современным представлениям считается, что в результате проникновения иона в твердое тело возникает каскад упругих столкновений смещенных атомов, при котором происходит обмен импульсом и энергией. Конечным результатом каскада столкновений является передача поверхностному атому энергии и импульса достаточной величины и необходимой направленности для преодоления сил связи атома в материале, в результате чего он распыляется.

Коэффициент распыления (КР) материалов S , определяемый как количество распыленных атомов, приходящихся на один бомбардирующий ион, является основным параметром, характеризующим распыляемость данного материала:

$$S = \frac{N_a}{N_i} = \frac{N_A \cdot \Delta m \cdot Z \cdot e}{A \cdot Q} = 96495 \frac{Z \cdot \Delta m}{A \cdot Q}, \quad (2.3)$$

где N_a - число распыляемых атомов мишени;

N_i - число бомбардирующих ионов;

N_A - число Авогадро, *атом·ион⁻¹*;

Δm - масса удаленных с поверхности атомов, *г*.

Z - краткость заряда ионов;

e - элементарный электрический заряд, *Кл*;

A - атомный вес материала, *г·моль⁻¹*;

Q - общий заряд ионов, пришедших на мишень, *Кл*,

$Q = I_i \cdot t$; I_i - ионный ток, *А*; t - время обработки, *с*.

Для большинства материалов КР находится в пределах $0.1-10 \text{ атом} \cdot \text{ион}^{-1}$. КР является многофакторной функцией и зависит от энергии бомбардирующего иона, его угла падения на распыляемую мишень, вида и массы иона и атома распыляемой мишени, состояния поверхности, давления рабочего газа в зоне распыления, вторичной электронной эмиссии мишени.

Практически установлено, что КР достигает максимального значения для данной комбинации ион-атом при энергии бомбардирующего иона до 1 кэВ ($1,6 \cdot 10^{-16} \text{ Дж}$), где зависимость носит линейный характер $S \sim E$, и при угле падения иона на мишень $55-70^\circ$.

Было отмечено, что КР уменьшается, когда давление рабочего газа превышает 1-2 Па. Это объясняется возвращением распыленных атомов на мишень из-за обратной диффузии низкоэнергетических атомов и обратного рассеяния высокоэнергетических атомов на атомах инертного газа.

2.4 Основные требования к оборудованию для ионно-плазменного распыления

Среди ряда требований, предъявляемых к установкам ИПР, использующим плазму в качестве инструмента при нанесении покрытий, можно выделить следующие основные требования:

- 1) высокая производительность установок;
- 2) равномерность толщины наносимых плёнок;
- 3) относительно высокий вакуум в зоне обработки;
- 4) способность вакуумной системы откачивать химически активные вещества (кислород, фреон и т.д.);
- 5) надежность, удобство эксплуатации, возможность автоматизации процессов.

Рассмотрим составные элементы отмеченных требований.

Производительность оборудования обычно рассчитывается в двух параметрах:

- 1) количество изделий, обрабатываемых в единицу времени ($\text{изделие} \cdot \text{ч}^{-1}$) – параметр, характеризующий возможность использования установки в данном технологическом процессе;
- 2) объем, осаждаемого в единицу времени вещества ($\text{нм} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$) – параметр, имеющий физический смысл, определяющий валовый перенос вещества на все изделия в установке и характеризующий мощность используемого устройства ИПР.

Производительность установки зависит от её геометрии и формы, эффективности использования подводимой мощности и принятой системы транспортировки обрабатываемых изделий. Установки могут быть циклического непрерывного действия.

Первый тип характеризуется загрузкой партии изделий и их последующей обработкой.

В установках второго типа происходит непрерывная передача изделий через шлюзовые камеры. Кроме выигрыша в производительности (к.п. - использования рабочего времени в установках циклического действия составляет 10% и менее), непрерывность процесса существенно повышает качество обработки изделий.

Равномерность толщины наносимых пленок зависит от формы потока выбитых с мишени частиц. В большинстве установок ИПР равномерность обеспечивается перемещением изделий по сложным траекториям. В высокочастотных установках равномерность нанесения зависит от равномерности разряда, равномерности потока газа, питающего плазму и равномерности плазмы. Особенно важно поддерживать

равномерность плазмы в тех системах, где изделия неподвижны при нанесении пленок.

Величина вакуума в зоне обработки зависит прежде всего от применяемой системы ИПР. Так, в системах с автономным ионным источником и в системах ИПР давление определяется только быстротой откачки и может варьироваться в широких пределах. В системах ИПР с самостоятельным тлеющим разрядом определенное давление рабочего газа является основным условием поддержания разряда, что определяет ограничения по вакууму и связанные с этим такие недостатки, как загрязнение пленок и снижение производительности за счет обратной диффузии и обратного отражения распыленных частиц.

Вакуумная система должна обеспечивать откачку химически активных газов – новая проблема, касающаяся в первую очередь масел для диффузионных и форвакуумных насосов. Наиболее перспективно применение криогенной откачки, когда в вакуумный объем вводится охлаждаемая до сверхнизких температур поверхность. В этом случае обеспечивается откачка всех газов, исключая гелий.

Требование надежности предъявляются ко всем технологическим установкам, используемым в микроэлектронике. Установки ИПР легко поддаются автоматизации, т.к. плазменные и ионные потоки сами являются носителями информации (ионный ток, разрядный ток, доза облучения и т.д.) и могут быть запрограммированы.

2.5 Электрофизические параметры систем ионно-плазменного распыления

Производительность системы ИПР определяется количеством нанесенного на поверхность изделия распыленного с мишени материала в единицу времени и выражается формулой (2.4):

$$Q_H = K_u \cdot V_p \cdot F_m , \quad (2.4)$$

где Q_H - количество материала, наносимого на поверхность подложки в единицу времени, $нм \cdot м^2 \cdot с^{-1}$;

K_u - коэффициент использования распыленного с мишени материала ($K_u \leq 0,8$);

V_p - скорость распыления с единицы поверхности материала мишени, $нм \cdot с^{-1}$;

F_m - площадь мишени, $см^2$;

Скорость распыления V_p может быть определена по формуле (2.5):

$$V_p = 6,25 \cdot 10^{22} \cdot j_i \cdot S \cdot A \cdot N_A^{-1} \cdot \rho , \quad (2.5)$$

где j_i - плотность ионного тока на мишень, $мА \cdot см^{-2}$;

S - коэффициент распыления, $атом \cdot ион^{-1}$;

A - атомный вес распыляемого материала, $г \cdot моль^{-1}$;

N_A - число Авогадро, $атом \cdot моль^{-1}$;

ρ - плотность распыляемого материала, $г \cdot см^{-3}$.

Приведенные выражения показывают, что увеличение производительности системы ИПР связано прежде всего с увеличением плотности ионного тока на мишени, площади мишени и площади подложки.

В свою очередь плотность ионного тока j_i можно повысить, главным образом, за счет увеличения концентрации ионов в плазме (см. формулу (2.2)).

В устройствах ИПР эта задача решается:

- 1) применением тлеющего разряда с термокатодом;
- 2) повышением давления в области разряда при снижении давления в области напыления.

Кроме того, плотность плазмы над мишенью зависит от параметров разряда, в основном от тока разряда I_p , который, в свою очередь, связан с током накала катода и давлением рабочего газа в области разряда.

Исходя из зависимостей электрических параметров, выбирается оптимальный режим работы устройства ИПР при максимальной его экономичности, которая определяется величиной ионного тока мишени, приходящегося на единицу мощности, подводимой к устройству:

$$H = \frac{I_i}{W}. \quad (2.6)$$

Одним из основных требований, предъявляемых к устройствам ИПР при их разработке и конструировании, является обеспечение высокой газовой экономичности, определяющей эффективность использования рабочего газа. Газовая экономичность представляет собой отношение числа атомов рабочего газа, превращенных в ионы плазмы, к общему числу атомов рабочего газа, подводимого к устройству:

$$h = \frac{N_{Ar}^+}{N_{Ar}} = \frac{I_i \cdot 3600 \cdot 100}{e \cdot Q \cdot n_0}, \quad (2.7)$$

где h - газовая экономичность, %;

I_i - ионный ток на мишень, $мА$;

e - заряд электрона, $Кл$;

Q - расход рабочего газа при нормальных условиях ($P = 1,02 \cdot 10^5 Па$, $T = 273К$), $см^3 \cdot ч^{-1}$;

n_0 - число молекул газа, содержащихся в $1 см^3$ при нормальных условиях ($n_0 = 2,687 \cdot 10^{19}$ молекул $\cdot см^{-3}$).

Бомбардирующий ион отдает энергию и импульс твердому телу, превращаясь при этом в нейтральную частицу, которую необходимо откачать из рабочей камеры. Следовательно, газовая экономичность определяет требуемые параметры вакуумной откачной системы и рабочее

давление в камере в зоне нанесения пленки. Увеличение газовой среды, чему способствует:

- 1) рациональная конструкция разрядной камеры;
- 2) рациональная конструкция системы подачи газа в зону ионизации;
- 3) повышение давления газа в разрядной камере;
- 4) использование магнитного поля;
- 5) осцилляция электронов в разряде.

2.6 Контрольные вопросы

1. Какова схема ионно-плазменного распылительного устройства?
2. Какие Вы знаете методы стимулирования разряда?
3. Как уменьшить количество газа в пленке?
4. Как оценить начало травления материала?
5. Как рассчитать коэффициент распыления?
6. Какие газы рекомендуется подавать при травлении материалов?
7. Какая плотность тока необходима для начала травления?
8. Как зависит скорость травления от тока, от напряжения?
9. Какие материалы имеют высокий коэффициент распыления?
10. Каково назначение балластного сопротивления в цепи разряда?

3 Экспериментальная часть

3.1 Задание на работу

3.1.1. Ознакомление с конструкцией триодной системы ИПР.

3.1.2. Исходя из геометрических размеров катода и анализа уравнения Ричардсона-Дэшмана, подсчитать максимально допустимое значение тока накала и величину тока эмиссии катода при его рабочей температуре.

3.1.3. Изучить принцип работы потокомера, применяемого в данной работе.

3.1.4. Снять зависимости тока разряда от давления рабочего газа при различных значениях тока накала катода и постоянном напряжении разряда.

3.1.5. Снять зависимости тока разряда от напряжения разряда при различных давлениях рабочего газа и для принятой рабочей температуры.

3.1.6. Снять зависимости тока разряда от тока накала катода при различных давлениях рабочего газа и постоянном напряжении разряда.

3.1.7. Снять зависимости тока мишени от напряжения мишени при различных значениях тока разряда.

3.1.8. Снять зависимости расхода рабочего газа от давления в разрядной камере.

3.1.9. На основании полученных зависимостей определить оптимальный режим работы системы ИПР и подсчитать ее газовую экономичность.

3.2 Описание лабораторной установки

3.2.1 Устройство триодной системы ИПР

В лабораторной работе исследуются характеристики триодной распылительной системы, схема устройства которой приведена на рис. 3.1.

Катод K распылительной системы выполнен из трех вольфрамовых проволок диаметром 0,7 мм, длиной 160 мм, сложенных параллельно и свитых в спираль. Катод закреплен на водоохлаждаемых токоподводах, расположенных в медной водоохлаждаемой камере. Камера закрыта медной крышкой со щелевой диафрагмой, формирующей столб разряда прямоугольной формы. С одной стороны столба разряда расположена медная водоохлаждаемая мишень M , с другой – стеклянная подложка L . Анод разрядной системы выполнен в виде диска из алюминия. Напуск рабочего газа аргона Ar производится непосредственно в область катода. На катодную камеру через сопротивление R подается напряжение от источника анодного питания $A2$. Такое включение электродов разрядной системы к источникам питания облегчает зажигание разряда. При горении разряда ток в цепи катодной камеры не превышает 0,2 А.

Регулятор накала катода расположен в правой стойке ВУП-4, а регулятор напряжения анода и напряжения мишени в нижней части левой стойки. Для включения блоков питания катода и мишени необходимо одновременно нажать кнопки $SB1$ и $SB2$ (ВЫПР и ИСП).

Триодная система ИПР смонтирована в рабочей камере откачного поста ВУП-4.

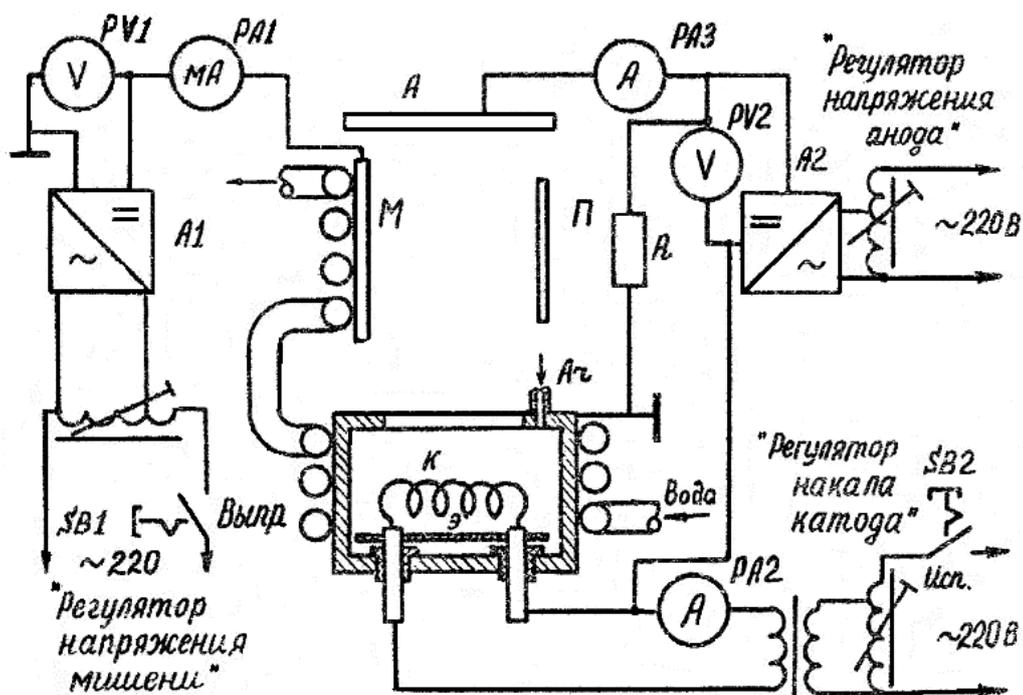


Рисунок 3.1 – Схема устройства триодной системы ИПР

3.2.2 Вакуумная система установки

Схема вакуумной системы откачного поста ВУП-4 приведена на рис.3.2.

Откачка камеры С1 может осуществляться механическим насосом 2НВР-5ДМ (NL1) и высоковакуумным диффузионным насосом Н-160/700 (ND1), имеющим скорость откачки $0,7\text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$. В форвакуумную магистраль введен дроссель DP1, который совместно с манометрическими датчиками PT3–PN6 типа ПМТ-6 входит в состав потокомера. Потокомер проградуирован по аргону.

Органы управления насосами, электромагнитными клапанами VE1 и VE2, натекателем VF1 расположены в правой стойке поста ВУП-4. Там же расположен вакуумметр, к входу которого подключены манометрические преобразователи PT2 (ПТМ-2) и PA2 (ПМИ-2). Электрические блоки остальных вакуумметров и потокомера расположены в стойке ВМБС-1.

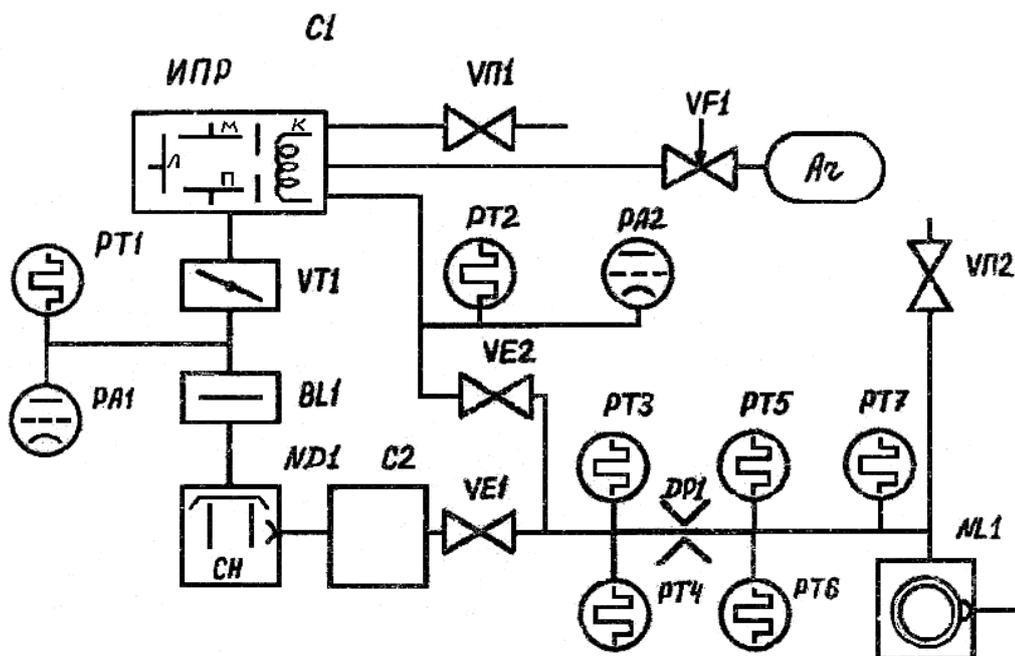


Рисунок 3.2 – Схема вакуумной системы установки

3.3 Порядок выполнения работы и методические указания

3.3.1. Для получения доступа к работе необходимо ответить на все поставленные вопросы.

3.3.2. Запустить вакуумную систему поста ВУП-4 и откачать объем рабочей камеры до предельного давления. Запуск вакуумной системы производится следующим образом. Проверить состояние клапана *VP2* (см. рис.3.2). Клапан должен быть закрыт (клапан находится на задней стенке ВУП-4). Запустить насос 2НВР-5ДМ (*NL1*) нажатием кнопки ФН (форвакуумный насос). Включить вакуумметр ВИТ-1А в стойке ВМБС-1 и проверить работоспособность насоса *NL1*. У нормально работающего насоса давление на входе его через 3-5 мин. После запуска должно быть не более 10 Па.

Откачать рабочую камеру *C1* механическим насосом. Для этого открыть клапан *VE2* путем нажатия кнопки ПВ (предварительный вакуум). После снижения давления в камере до 8-10 Па (по вакуумметру поста ВУП-4 с преобразователем *PT2*) приступить к запуску диффузионного насоса Н-160/700 (*ND1*). Для этого открыть клапан *VE1* (тарельчатый клапан *VT1* должен быть закрыт) нажатием кнопки ВВ (высокий вакуум). Электрическая схема управления клапанами сначала закроет клапан *VE2*, а затем через 1-2 с. откроет клапан *VE1*. Когда давление *ND1* достигнет 6-10 Па (по вакуумметру ВИТ-1А стойки ВМБС-1), подать воду в систему охлаждения насоса и электродов устройства ИПР. Затем включить нагреватель насоса *ND1* нажатием кнопки ДН (диффузионный насос).

После выхода насоса *ND1* на рабочий режим (через 50-80 мин.) (контроль ведется по показателям вакуумметра ВИТ-1А). Выключить катод манометрического преобразователя *PA1* и, если давление в камере *C1*

не более 20 Па, открыть клапан *VT1*. Когда давление на входе насоса *ND1* вновь станет меньше $1 \cdot 10^{-1}$ Па, включить катод преобразователя *PT1*. После этого включить электрический блок потокомера и вращением ручки УСТАНОВКА НУЛЯ вывести стрелку показывающего прибора потокомера на нулевое деление.

Когда в вакуумном объеме *C1* будет достигнут предельный вакуум, необходимо произвести корректировку нуля показывающего прибора потокомера и приступить к выполнению экспериментов, предусмотренных заданием.

При использовании характеристик триодной распылительной системы давление в объеме поддерживать в пределах $(4 - 9,8) \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. (вакуумметр поста ВУП-4 проградуирован в миллиметрах ртутного столба). Ток накала катода не должен превышать 80-90 А, а ток анода – 3 А. Напряжение, подаваемое на мишень, изменять в пределах 200-2000 В.

Перед подачей напряжения на катод ИПР установить в камере *C1* максимальное давление аргона ($9,8 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) посредством натекателя *VF1*.

Эксперимент следует начинать со снятия зависимостей тока разряда от давления рабочего газа при различных значениях тока накала и напряжения на аноде. Одновременно определяется зависимость расхода рабочего газа от давления в разрядной камере. При построении данной зависимости следует пользоваться градуировочной кривой потокомера, приведенной на рис.3.3.

3.3.3. Остановка вакуумной системы поста ВУП-4 производится следующим образом.

Закрывать натекатель *VF1* и выключить ионизационные вакуумметры (катоды ламп ПМИ-2). Выключить питание электродов ИПР. Закрывать клапан *VT1* и отключить нагреватель насоса *ND1* кнопкой ДН. Для ускорения охлаждения насоса включить вентилятор, находящийся внутри корпуса установки. Через 30-40 мин закрыть клапан *VE1* нажатием кнопки ОТКЛ. (отключено). Выключить термопарные вакуумметры и остановить механический насос. Открыть на 1-3 с. клапан *VII2* и вновь его закрыть. Перекрыть воду в системе охлаждения установки. Выключить вентилятор и отключить установку отжатием кнопки СЕТЬ.

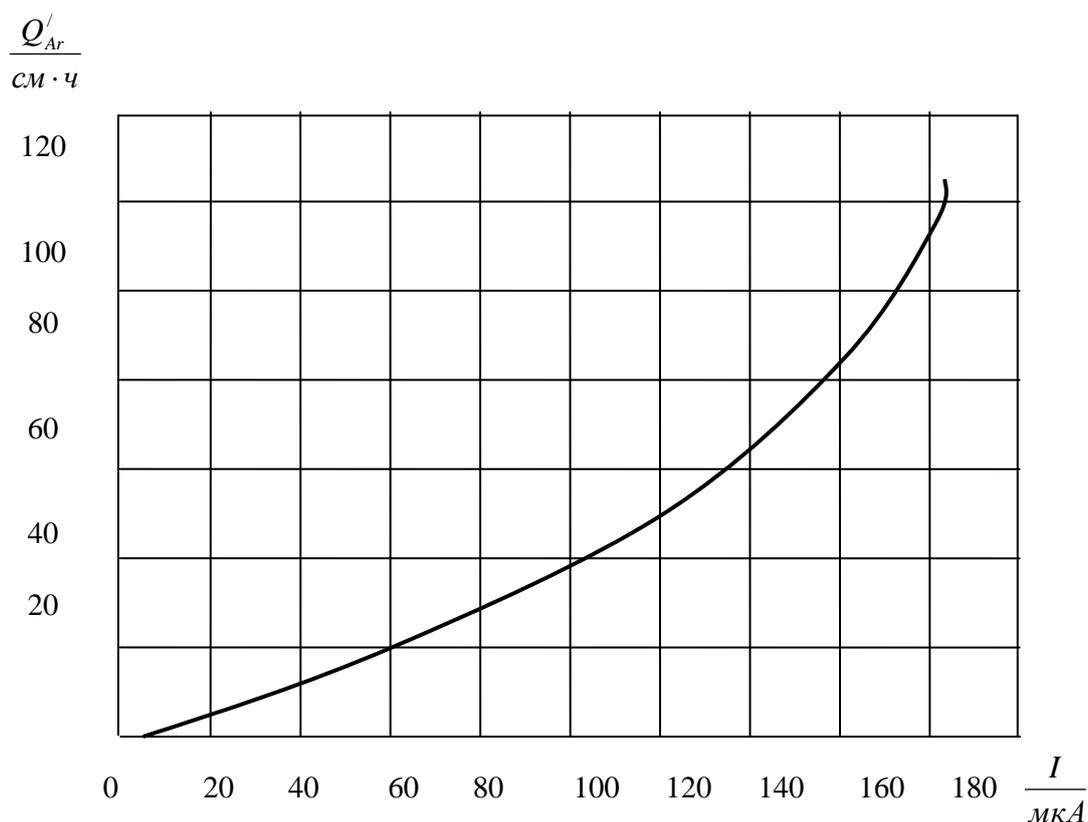


Рисунок 3.3 – Градуировочная кривая потокомера

3.4 Содержание отчета

3.4.1. При составлении отчета необходимо руководствоваться общими требованиями и правилами оформления отчета о лабораторной работе.

3.4.2. В соответствующих разделах отчета необходимо представить:

- 1) задание;
- 2) схему устройства ИПР;
- 3) схему вакуумной системы поста ВУП-4;
- 4) таблицы экспериментальных данных;
- 5) результаты расчетов, предусмотренных заданием;
- 6) выводы.

При составлении вакуумной схемы следует руководствоваться правилами выполнения принципиальных вакуумных схем, регламентируемых ГОСТ.

Рекомендуемая литература

1. Галант В.Е. Основы физики плазмы: учеб.пособие / В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров.- Санкт - Петербург : Лань, 2011. – 448 с.
2. Рожанский В. А. Теория плазмы: учеб. пособие. - Санкт-Петербург: Лань, 2012. - 320 с.

3. Процессы лазерной и электронно-ионной технологии: Учебное пособие / Аксенов А. И. - 2018. 123 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/7262>.

Учебное пособие

Орликов Л.Н.

Исследование процессов ионной обработки материалов
и ионно-плазменного распыления материалов

Методические указания к лабораторным работам
для студентов
направления 11.04.04 – Электроника и наноэлектроника
и направления 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика

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