

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Курмачев Дмитрий Андреевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование влияния формы анода планарной МРС на
вольтамперные характеристики**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20301

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. А.С. Золкин

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 2021г.

Консультант:

вед. инженер С.Ю. Чепкасов

Преподаватель практикума:

к.ф.-м.н. А. В. Судников

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 2021г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 2021г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Исследовано влияния формы анода планарной магнетронной распылительной системы на вольтамперную характеристику, сравнение вольтамперной характеристики классической магнетронной системы с полученной, а также нахождение параметров, которые увеличат эффективность системы. Использована магнетронно-распылительная система с цилиндрическим анодом и диафрагмой диаметром 80 мм. Изучены вольтамперные характеристики и определены оптимальные параметры работы магнетронно-распылительной системы (расход газа 200 мл/мин и диапазон токов разряда 0,1–0,3 А). Проведено сравнение с магнетронно-распылительной системой классического вида. Выявлена большая эффективность у варианта с цилиндрическим анодом и диафрагмой, чем у классического.

Ключевые слова: магнетронная распылительная система, вольтамперная характеристика, разряд в газе.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть.....	4
2.1 Движение заряженной частицы в плазме	4
2.2 Принцип действия МРС.....	5
2.3 Вольт-амперные характеристики	6
3. Экспериментальная часть.....	7
3.1 Описание установки	7
3.2 Проведение эксперимента	9
4. Результаты и их обсуждение	9
4.1 Результаты эксперимента	9
4.2 Обсуждение результатов	12
5. Выводы.....	13
6. Благодарности	13
7. Литература	13

1. Введение

В последние годы наметился заметный интерес к новому классу материалов, обладающих необычной атомно-кристаллической решеткой и уникальными свойствами. К этому новому классу материалов — наноматериалов — относят материалы с размером элементов менее 100 нм. [2]

Наиболее перспективным методом нанесения данных покрытий является магнетронное распыление, обеспечивающее формирование совершенной нанокompозитной структуры покрытия с высокой гладкостью поверхности, обладающей низким коэффициентом трения и гарантирующей высокоэффективную защиту от износа и коррозии при повышенных температурах [3]. Эффективность работы магнетронной распылительной системы (MPC) зависит от правильного выбора рабочих параметров. Например, таких как расход газа, напряжения, геометрии анода.

Основной целью данной работы является исследование влияния формы анода на вольтамперные характеристики (ВАХ) для поиска оптимального режима напыления, а также сравнение эффективности магнетронной распылительной системы, на которой находится цилиндрический анод с диафрагмой, внутрь которого напускается рабочий газ, с классическим вариантом (без цилиндрического анода и с напуском газа непосредственно в камеру).

2. Теоретическая часть

2.1 Движение заряженной частицы в плазме

В неоднородных скрещенных электрическом и магнитном полях заряженные частицы совершают дрейфовые движения. Траектория движения электронов в плазме магнетронных распылительных систем очень сложна, и описать ее аналитически с учетом всех составляющих движения практически невозможно. Количественный учет сложного движения заряженных частиц в газе проводится обычно разложением его на две составляющие: беспорядочное (диффузионное) и направленное движение. Преобладание того или иного вида движения зависит от давления газа и напряженности электрического поля, действующего в области

разряда. Критерием оценки характера движения частиц является отношение E/p . Если значение этого отношения велико, то преобладающим является направленное движение под действием электрического поля.

Рассмотрим уравнение движения заряженной частицы в электромагнитном поле:

$$M_{\text{ч}} \frac{dv}{dt} = q(\mathbf{E} + [\mathbf{v}\mathbf{B}]) \quad (1)$$

где $M_{\text{ч}}$ и q - масса и заряд частицы, \mathbf{E} - напряженность электрического поля, \mathbf{B} - индукция магнитного поля, \mathbf{v} - вектор скорости заряженной частицы.

В магнетронном разряде индукция магнитного поля обычно не превышает 0,1 Тл, и второе слагаемое для ионов существенно меньше силы электрического поля, поэтому можно не учитывать действие на ионы магнитного поля. Электроны обладают существенно меньшей массой, и магнитное поле сильнее влияет на их движение. Поэтому при рассмотрении процессов в магнетронной распылительной системе в первую очередь анализируют влияние магнитного поля на движение электронов. [1]

2.2 Принцип действия МРС

Схема классической магнетронной распылительной системы показана на рис.1

Основными элементами устройства являются катод-мишень, анод и магнитная система. Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между местами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой магнитной системы.

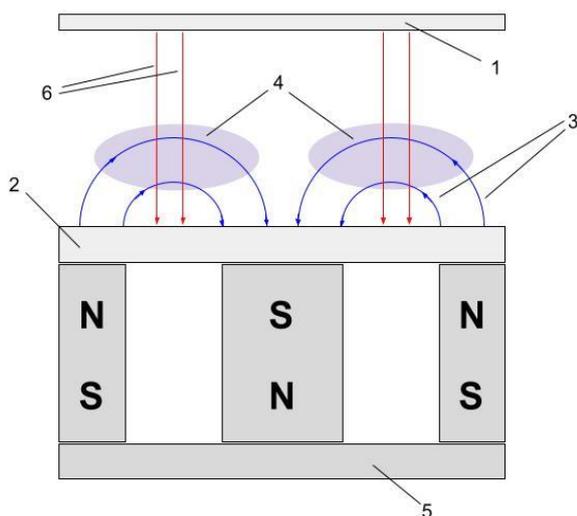


Рис.1. Схема классического МРС. 1- подложка (анод), 2- мишень (катод), 3- линии магнитного поля, 4- область скопления электронов в скрещённых электрическом и магнитном полях, 5- магнитопровод, 6- линии электрического поля

Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхности мишени. Электроны оказываются в ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых электрон потеряет полученную от электрического поля энергию.

Молекула рабочего газа после ионизации начнет лететь к катоду, выбивая из него молекулы. Эти молекулы летят в сторону подложки и создают слой на ней.

[1]

2.3 Вольтамперные характеристики

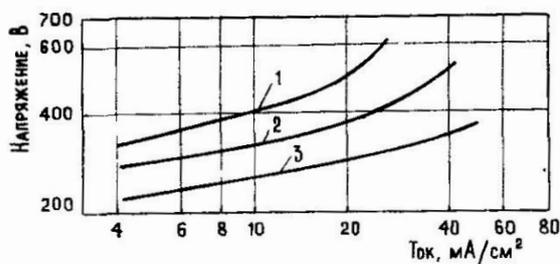


Рис 2. ВАХ для различных давлений аргона в планарном магнетроне: 1- 10⁻¹ Па; 2- 2,5*10⁻¹ Па; 3- 1,3 Па [4]

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный или нулевой потенциал) возникает аномальный тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля у распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны захватываются магнитным полем, им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у

Магнетроны в режиме постоянного тока обычно работают при давлении аргона 0,3 – 1,3 Па (10⁻² – 10⁻³ мм. рт. ст.) и катодном потенциале 300-700 В. Типичные вольтамперные характеристики при различных давлениях в планарном магнетроне

приведены на рис. 2 (плотность тока в зоне эрозии мишени может быть в 4 раза выше средней плотности тока, приведенной на рис. 2). Для оптимальных значений формы и интенсивности магнитного поля кривые, приведенные на рис. 2, удовлетворяют уравнению:

$$I = KU^n \quad (2)$$

где I - ток на катоде; U - потенциал катода; n - показатель эффективности улавливания электронов магнитной ловушкой, его значения лежат в пределах 5-9; K - коэффициент, характеризующий систему.

ВАХ позволяют судить об эффективности ионизации в разрядной системе. Чем более эффективно удерживаются электроны в плазме, тем выше показатель степени n . [4]

3. Экспериментальная часть

3.1 Описание установки

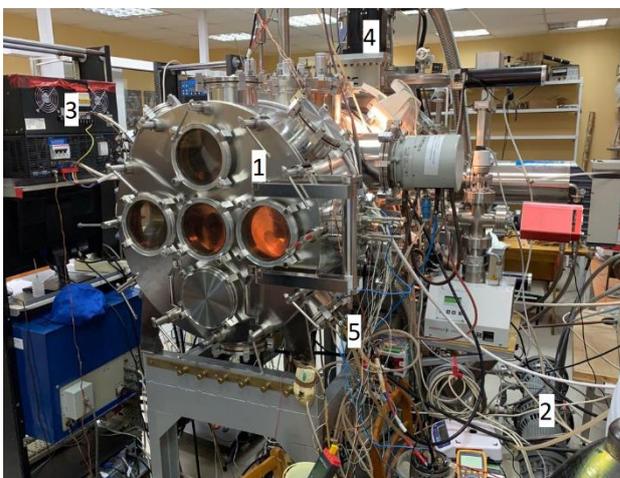


Рис.3а Внешний вид экспериментальной установки.

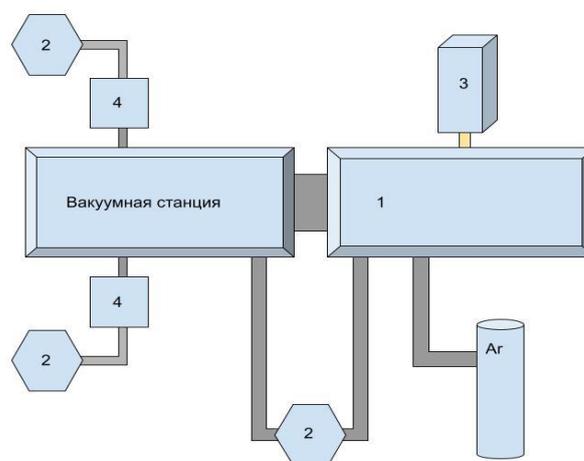


Рис.3б Схема экспериментальной установки.

Обозначения: 1- вакуумная камера 2-форвакуумный насос, 3- система питания, 4- турбомолекулярный насос, 5- система подачи воды для охлаждения

Экспериментальная установка состоит из трёх частей: вакуумной камеры с магнетронной распылительной системой внутри, вакуумной станции с турбомолекулярными насосами и системы подачи газа в вакуумную камеру. Внешний вид, а также схема приведен на рис. 3а и рис. 3б соответственно. Рассмотрим каждую часть по отдельности.

В вакуумной камере, объём которой составляет 1 м^3 , находится магнетронная распылительная система. К камере подключен форвакуумный насос, который уменьшает давление до 10 Па . Этот же насос подключен и к вакуумной станции. Из вакуумной станции воздух откачивают два турбомолекулярных насоса. Станция и камера соединены вакуумным затвором, который убирается, когда давление в вакуумной камере упадёт до 10 Па . Газ подаётся из баллона с аргоном. С помощью программы на персональном компьютере осуществляется управление регулятором расхода газа. Максимальный расход составляет 200 мл/мин при нормальных условиях.

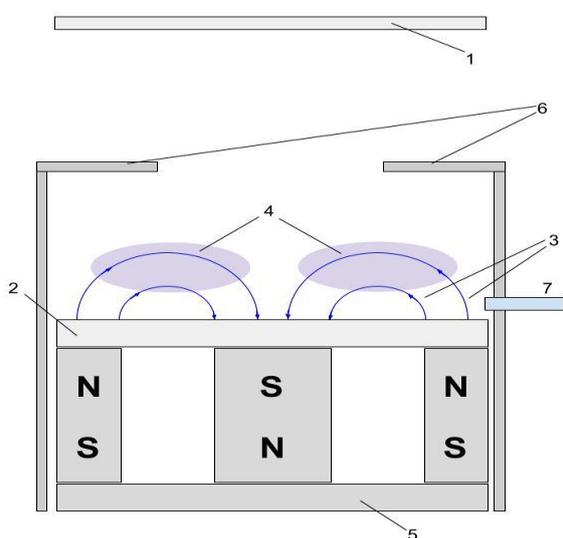


Рис 4. Схема МРС, которая использовалась в эксперименте. 1- подложка; 2- мишень-катод; 3- магнитные линии; 4- области скопления электронов в скрещённых электрическом и магнитном полях; 5- магнитопровод; 6- цилиндрический анод с диафрагмой; 7- труба для подачи газа

Схема магнетронно-распылительной системы, которая используется в эксперименте, показана на рис. 4. Принцип работы такой же, как и у классической магнетронной распылительной системы. Конструктивное различие заключается в наличии цилиндрического анода с диафрагмой диаметром 80 мм , внутрь которого подается рабочий газ. Это позволяет локально увеличить концентрацию атомов аргона вблизи мишени, что приведет к уменьшению затрат газа и напряжения, необходимого для ионизации газа по сравнению с классическим МРС, когда газ напускается в окружающий вакуумный объем. Блок питания магнетрона представляет собой биполярный источник питания, который работает в импульсном режиме. В промежутки времени, когда источник подаёт небольшой кратковременный положительный потенциал, с мишени снимается окисная

Схема магнетронно-распылительной системы, которая используется в эксперименте, показана на рис. 4. Принцип работы такой же, как и у классической магнетронной распылительной системы. Конструктивное различие заключается в наличии цилиндрического анода с диафрагмой диаметром 80 мм , внутрь которого подается рабочий газ. Это позволяет локально увеличить концентрацию атомов аргона вблизи мишени, что приведет к уменьшению затрат газа и напряжения, необходимого для ионизации газа по сравнению с классическим МРС, когда газ напускается

плёнка. В следующий момент потенциал меняется на отрицательный, и тогда происходит напыление. Если этого не делать, то положительный заряд, который накапливается на диэлектрике, будет отталкивать ионы, бомбардирующие его поверхность. Система охлаждения водой поддерживает оптимальную температуру МРС.

3.2 Проведение эксперимента

Сперва откачиваем воздух в камере до значения $2,4 \cdot 10^{-4}$ Па. Блок питания работает в режиме стабилизации постоянного тока, поскольку в именно в этом режиме принято проводить напыление. В противном же случае в магнетроне могут возникать микродуги, которые распыляют крупные части мишени. Из-за этого могут возникать капли на подложки, которые нарушают качество покрытия. Расход газа увеличивался от 60 до 200 мл/мин с шагом 20 мл/мин. Именно при 60 мл/мин происходит ионизация газа, при меньших значениях плазма не поддерживалась и гасла сразу же. Значение тока устанавливалось от 100 до 300 мА с шагом в 50 мА и с 400 до 1900 мА с шагом в 100 мА. При определенном значении тока и расхода были получены значения напряжений.

4. Результаты и их обсуждение

4.1 Результаты эксперимента

В результате эксперимента с магнетронной распылительной системой, на которой был установлен цилиндрический анод с диафрагмой, были получены данные, по которым были построены различные зависимости (рис. 5 – 7, 9). Рис. 8 соответствует классическому варианту МРС. Также были построены аппроксимирующие кривые степенного вида, где, согласно формуле 2, степень будет являться показателем эффективности удержания электронов магнитной ловушкой. Уравнения каждой кривой занесены в таблицу 1. Для оптимального представления были выбраны минимальные и максимальные значения, а также некоторые промежуточные. На рис. 9 изображены данные и аппроксимирующие кривые степенного вида для малых токов ($\leq 0,5$ А), а также для средних и больших (максимально возможных) токов ($0,8 \text{ А} \leq I \leq 1,9 \text{ А}$). Уравнения этих

кривых занесены в таблицу 2. На кривых указаны погрешности для расхода газа ($\pm 1\%$) и для источника питания ($\pm 3\%$). Погрешность вакуумметров составляла $\pm 30\%$.

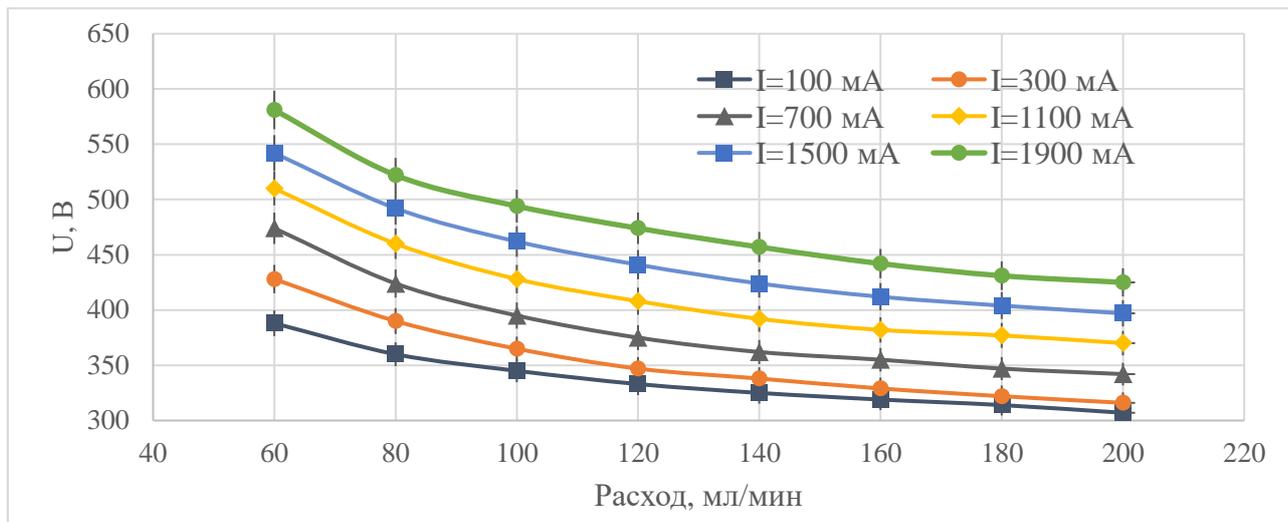


Рис. 5. Зависимость напряжения разряда от расхода газа при различных значениях тока разряда

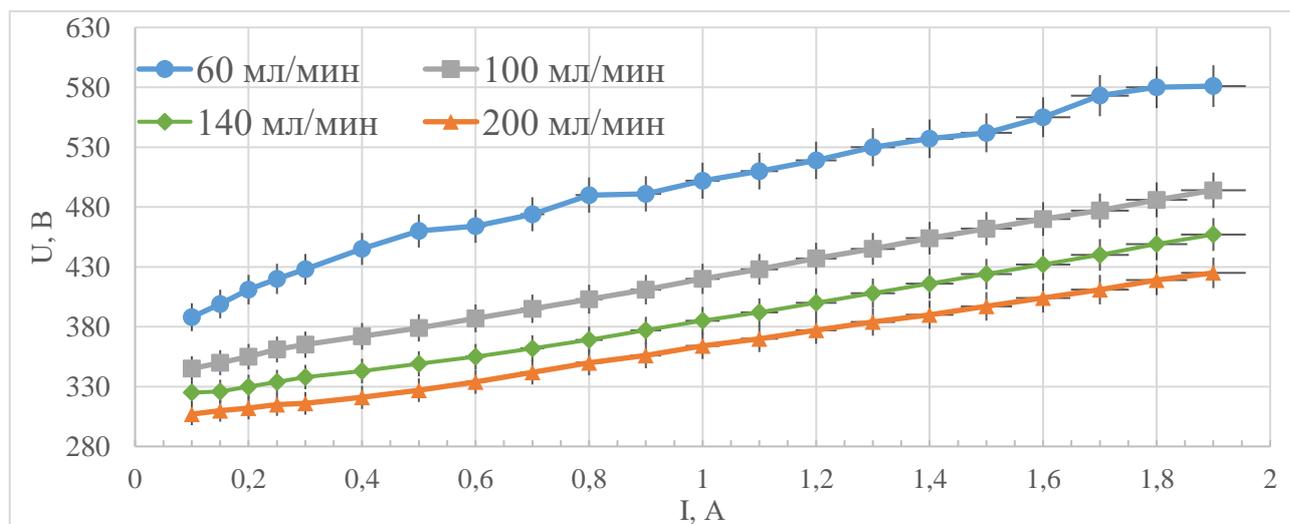


Рис. 6. Зависимость напряжения разряда от тока разряда при различных расходах газа.

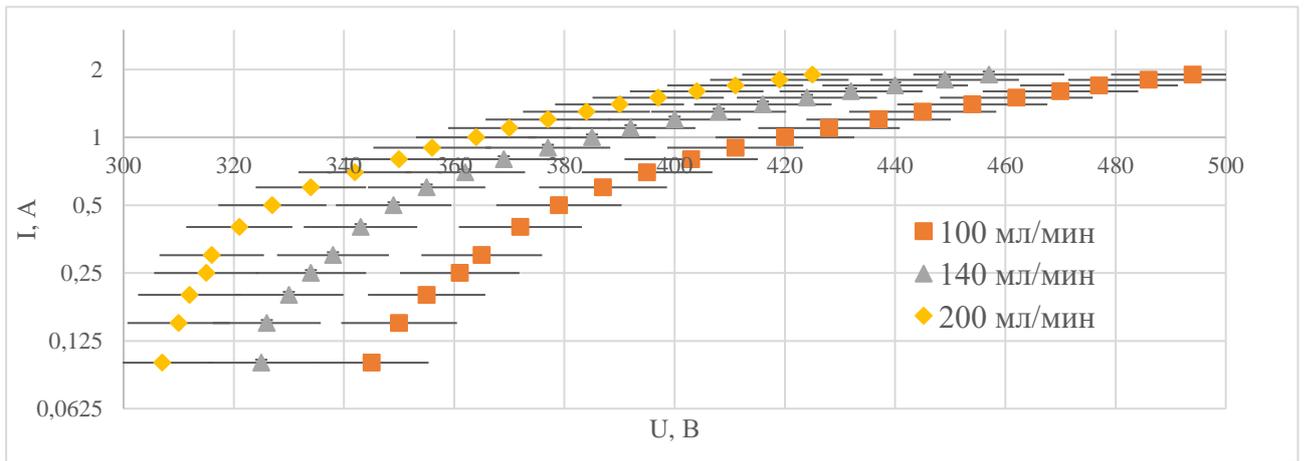


Рис. 7. Зависимость тока разряда от напряжения разряда при различных расходах газа в логарифмическом масштабе

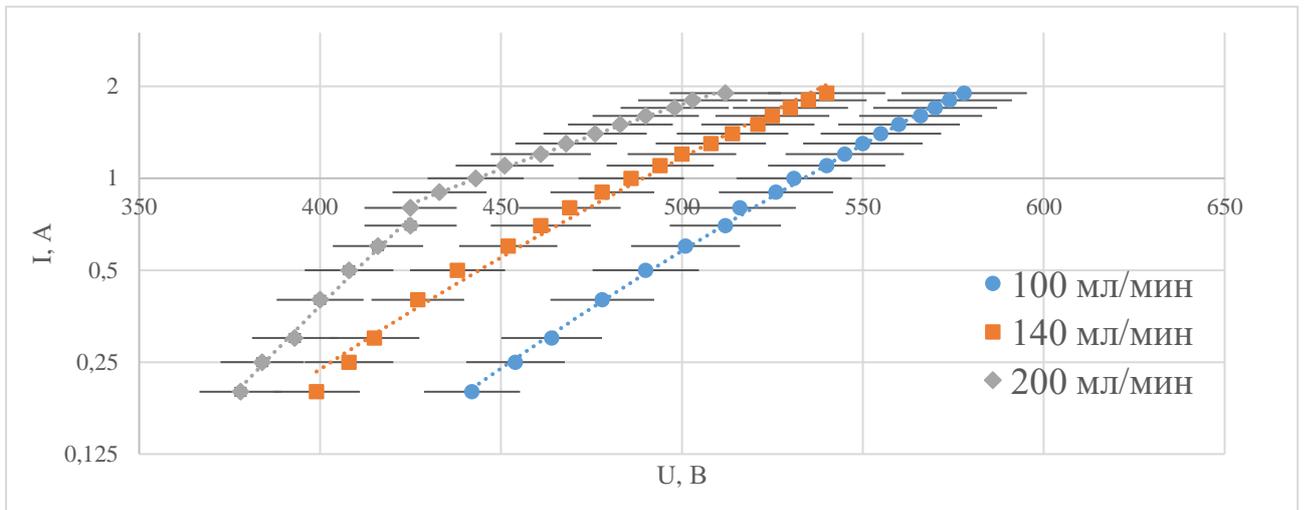


Рис. 8. Зависимость тока разряда от напряжения разряда при различных расходах газа с аппроксимирующими кривыми (классическая геометрия)

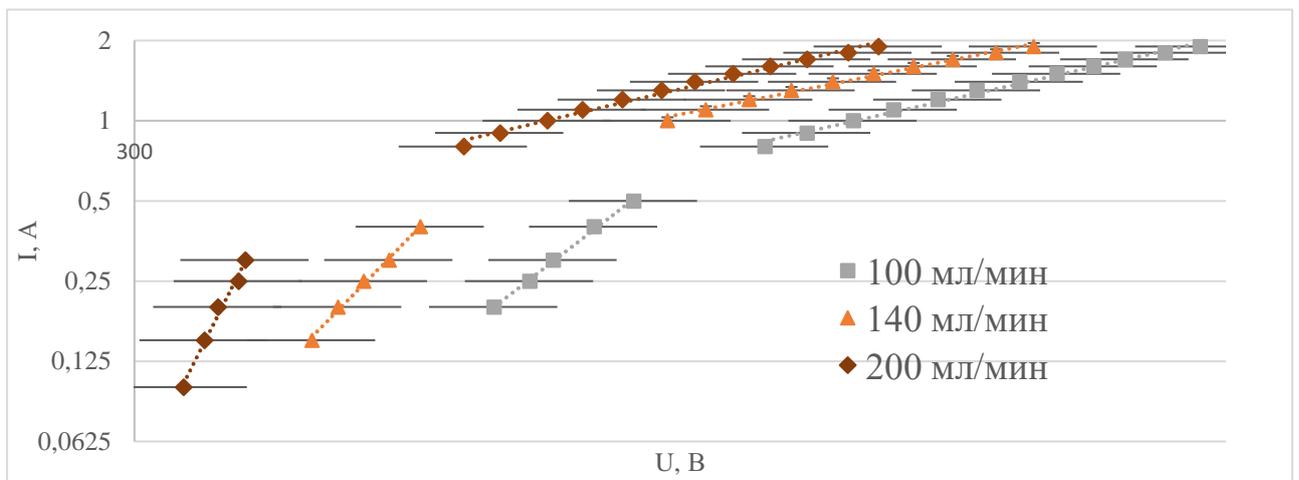


Рис. 9. Зависимость тока разряда от напряжения разряда при различных расходах газа с аппроксимирующими кривыми

4.2 Обсуждение результатов

Из рис. 7 видно, что график невозможно аппроксимировать одной кривой степенного вида, поэтому на рис. 9 график разделен на части. Каждая часть представляет собой кривую, отображающую приближение к уравнению вида формулы 2. На рис. 8 на две части разделена только кривая, соответствующая расходу газа, равному 200 мл/мин.

Таблица 1. Уравнения аппроксимирующих кривых при определенных расходах газа и диапазонах тока разряда. Классическая магнетронная распылительная система.

Расход, мл/мин	Диапазон значений тока разряда, А	Уравнение аппроксимирующей кривой
200	0,1 – 0,7	$10^{-29}x^{10,94}$
	0,8 – 1,9	$6*10^{-13}x^{4,62}$
140	0,2 - 1,9	$6*10^{-20}x^{7,15}$
100	0,2 - 1,9	$10^{-23}x^{8,41}$

Таблица 2. Уравнения аппроксимирующих кривых при определенных расходах газа и диапазонах тока разряда. Магнетронная система с цилиндрическим анодом и диафрагмой.

Расход, мл/мин	Диапазон значений тока разряда, А	Уравнение аппроксимирующей кривой
200	0,1 – 0,3	$10^{-92}x^{36,55}$
	0,8 – 1,9	$6*10^{-12}x^{4,37}$
140	0,15 – 0,4	$7*10^{-49}x^{18,84}$
	1 – 1,9	$3*10^{-10}x^{3,69}$
100	0,2 – 0,5	$8*10^{-38}x^{14,27}$
	0,8 – 1,9	$10^{-11}x^{4,18}$

По данным из таблицы 1 видно, что для классической геометрии системы максимальная эффективность захвата электронов, следовательно, эффективность ионизации молекул газа выше, когда расход равен 200 мл/мин, а значение тока разряда находится в диапазоне от 0,1 А до 0,7 А, и равен 10,94. По

таблице 2 также максимальный показатель эффективности достигается при небольших токах (0,1 – 0,3 А) и расходе газа 200 мл/мин, и он равен 36,55. Сравнивая два значения, можно с уверенностью сказать, что наиболее эффективной является магнетронная распылительная система с цилиндрическим анодом и диафрагмой, чем классическая система. Сравнивая показатели степени можно также обнаружить, что при некоторых расходах и определённом диапазоне токов система с классической геометрией может оказаться более эффективной, чем система с цилиндрическим анодом и диафрагмой. Например, при расходе газа равному 100 мл/мин и при большом токе эффективность классической системы больше практически в два раза.

5. Выводы

Измерены и проанализированы вольтамперные характеристики магнетронной распылительной системы, на которой был установлен цилиндрический анод с диафрагмой. Проведено сравнение с классической МРС (без цилиндрического анода и с напуском газа в камеру). Благодаря полученным данным удалось определить оптимальный режим для работы МРС: на магнетроне должен находиться цилиндрический анод с диафрагмой, расход газа должен составлять 200 мл/мин и диапазон токов 0,1 – 0,3 А. При таких условиях показатель эффективности равен 36,55.

6. Благодарности

Выражаю огромную благодарность Золкину Александру Степановичу за помощь в выборе темы и объяснение основ работы магнетронной распылительной системы; Чепкасову Сергею Юрьевичу за консультацию по работе экспериментальной установки, помощь в проведении экспериментов и обсуждение результатов; Эрфурт Анне, Майору Ивану и Буркову Андрею за помощь в проведении экспериментов.

7. Литература

1. Данилин Б. С., Сырчин В. К. Магнетронные распылительные системы // «Радио и связь», 1982, 72 с.

2. Нанотехнологии и наноматериалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://extxe.com/14972/nanotehnologii-i-nanomaterialy-2/>
3. Федотов А. В., Агабеков Ю. В., Мачикин В. С. Многофункциональные нанокompозитные покрытия // Наноиндустрия. 2008. № 1. С. 24–26.
4. Минайчев В.Е., Одинокоев В.В., Тюфаева Г.П. Магнетронные распылительные устройства (магратроны) // ЦНИИ «Электроника», 1979. 57 с.