

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Майор Иван Александрович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование ВАХ магнетронно-распылительной системы с  
протяженным анодом**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20302

**Научный руководитель:**

к.ф.-м.н. Золкин А.С.

**Консультант:**

вед. инж. С. Ю.Чепкасов

Оценка научного руководителя

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Преподаватель практикума**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Оценка преподавателя практикума

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Куратор практикума:**

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

\_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Новосибирск 2021

## **Аннотация**

Исследовались вольт-амперные характеристики (ВАХ) магнетронно-распылительной системы (МРС) с особыми граничными условиями для поиска наиболее оптимального режима напыления. В качестве граничного условия был выбран протяжённый цилиндрический анод, который устанавливался на кольцевой распределитель газа, через который рабочий газ подавался прямо к мишени-катоду. Измерены вольтамперные характеристики и зависимости напряжения магнетрона от расхода газа. Определены оптимальные режимы для напыления, а именно: оптимальный анодный ток (0,1 А - 0,6 А), оптимальный расход газа (200 мл/мин). Полученные данные подчиняются известной теории, но с учетом значительного вклада граничных условий, а также из-за того, что в работе использовались большие значения расхода газа и разрядного тока, были установлены границы применимости данной теории. Результаты будут использованы для оптимизации эффективности процесса напыления, а также для напыления покрытий на полимерные подложки, не терпящие высокой температуры нагрева во время синтеза.

Ключевые слова: вольтамперная характеристика, магнетронно-распылительная система, напыление плёнок, граничные условия, скрещенные поля, расход газа.

## Оглавление

1. Введение.....	4
2. Краткая теория .....	4
2.1. Устройство и принцип действия МРС .....	4
2.2. Движение частиц в скрещенных полях.....	6
2.3. Вольтамперные характеристики МРС .....	7
3. Экспериментальная установка.....	7
3.1. Описание установки .....	7
3.2. Проведение эксперимента .....	9
4. Результаты и их обсуждения .....	10
5. Выводы .....	12
6. Благодарности .....	13
7. Литература.....	13

## 1. Введение

В последние десятилетия системы магнетронного распыления различных типов стали стандартом во многих лабораториях и производственных предприятиях, заменив старые системы диодного распыления и взяв на себя функции, ранее выполнявшиеся методами, отличными от распыления. Магнетронно-распылительные системы (МРС) обладают рядом производственных преимуществ, включая высокую скорость осаждения (несколько мкм/мин для металлов) на больших площадях (мишени размером 2 м × 30 см) и относительно низкие температуры подложки (200 °С при скорости осаждения 1 мкм/мин) [1].

Из результатов проведенных исследований [2] известно, что одним из основополагающих факторов формирования качества синтезируемых покрытий является качество плазмы, на рабочей зоне магнетрона. Давление газа в вакуумной камере в процессе нанесения покрытия находится в динамической взаимосвязи с технологическими параметрами процесса, такими как разрядные токи и напряжения, ток и напряжение смещения, концентрация реактивного газа. Следовательно, рабочее давление газа в магнетронно-распылительной системе играет важную роль в процессе магнетронного нанесения покрытий.

В данной работе исследуются вольта-амперные характеристики (ВАХ) МРС при наличии протяженного(в вертикальном направлении)анода, установленного на магнетроне. Наличие такого граничного условия позволяет оптимизировать различные характеристики магнетрона (по сравнению с классическим МРС, где нет протяженного анода, а газ подается в вакуумную камеру), например, расход рабочего газа и мощность МРС, что позволяет экономить газ, снизить энергопотребление МРС и температуру синтеза покрытий. Последний факт является важным показателем при нанесении покрытий на полимерные подложки, которые не терпят высокой температуры во время синтеза.

## 2. Краткая теория

### 2.1. Устройство и принцип действия МРС

Магнетронная распылительная система включает в себя магнетрон, с установленной на нём распыляемой мишенью, и подложку для осаждения вещества мишени.

Все конструктивные элементы МРС монтируются в корпусе, присоединяемом к рабочей камере. Дискообразная мишень-катод, как и нижняя

часть корпуса магнетрона охлаждается проточной водой через парные трубки (впуска и выпуска), расположенные внутри корпуса.

На катод подается напряжение порядка 300-1000 В. Под катодом расположен магнитный блок, состоящий из центрального и периферийных постоянных магнитов, закрепленных на основании блока из магнитомягкого материала. Магнитный блок создает над поверхностью катода дугообразное неоднородное магнитное поле напряженностью в несколько сот эрстед. Над катодом расположен анод, который находится под потенциалом земли.

Данное расположение анода обеспечивает образование тороидального электрического поля с составляющей, перпендикулярной к плоскости катода. При подаче отрицательного потенциала на катод в прикатодной области образуется зона со скрещенным неоднородным электромагнитным полем.

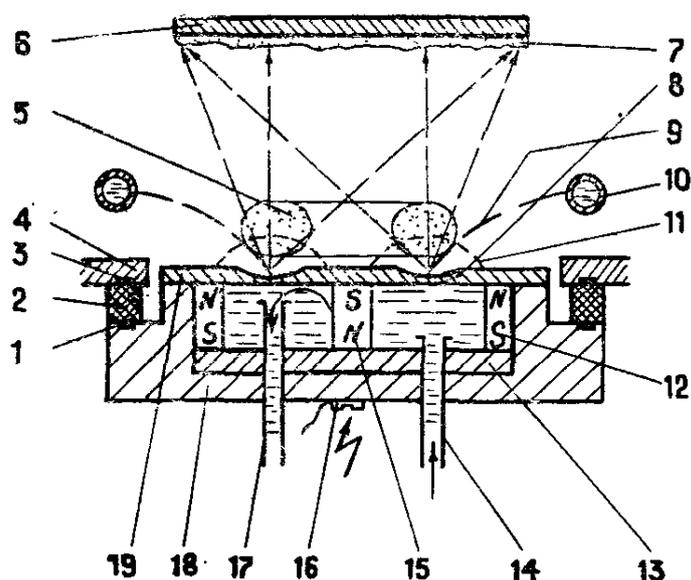


Рис.1 Вид классического MPC в разрезе[3]

1,3 – вакуумный уплотнитель; 2 – изолирующее кольцо; 4 - фланец, 5 – тороидальная зона тлеющего разряда, 6 – подложка, 7 - пленка из осажденного вещества, 8 – зона эрозии, 9 – силовая линия эл. поля, 10 – анод, 11 - силовая линия магн. поля, 12 - внешнее кольцо магнитов, 13 – основание системы магнитов (магнитопровод); 14, 17 – система охлаждения; 16 - клемма катода, 18 – корпус магнетрона, 19 – катод-мишень

Появившиеся в этой зоне электроны совершают сложные движения под действием скрещенных полей, участвуя в многократных жестких (ионизирующих) столкновениях с молекулами газа. В результате этого над поверхностью катода возникает кольцеобразная (торообразная) зона плазмы, образуется аномальный тлеющий разряд. Геометрия плазменного образования определяется формой неоднородного магнитного поля над поверхностью катода.

Положительные ионы, образующиеся в разряде, ускоряются в направлении катода, бомбардируют его поверхность в зоне эрозии, выбивая из нее частицы материала. Покидающие поверхность мишени частицы осаждаются в виде пленки на подложке, а также частично рассеиваются на молекулах остаточных газов и осаждаются на стенках рабочей вакуумной камеры.

Плотность плазмы в разряде и интенсивность эрозии мишени максимальны в области, где магнитные силовые линии имеют направление, близкое к параллельному относительно поверхности катода.

При бомбардировке поверхности мишени ионами проявляются два основных эффекта: вторичная электронная эмиссия и ионное (катодное) распыление материала мишени. Вторичная эмиссия служит для поддержания разряда, а распыленные частицы формируют пленочный осадок на подложках.[3]

## 2.2. Движение частиц в скрещенных полях

Магнитное поле в магнетроне характеризуется тем, что концы магнитных силовых линий (рис. 3) являются «вмороженными» в поверхность катода. Азимутально дрейфующие электроны, движущиеся также по ларморовским окружностям в направлении силовых линий, отражаются от поверхности катода.

Интенсивная ионизация возникает в средней части между плюсами магнита, где векторы  $E$  и  $B$  перпендикулярны друг другу. По краям этой части векторы  $E$  и  $B$  близко совпадают по направлению. При этом создаются условия радиальной и продольной фокусировки электронов, которые оказываются как бы в магнитной ловушке.

В планарных магнетронных устройствах дрейфовое движение электронов в плазме имеет сложный характер. Так как магнитные силовые линии имеют кривую форму, вектор  $B$  может быть разложен на две взаимно перпендикулярные составляющие  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$ .

Электроны в таких полях совершают дрейф под воздействием полей  $B_{\parallel} \times E$  по направлению  $V_d$ . Скорость электронов имеет составляющую в направлении  $B_{\parallel}$ , но вследствие сохранения магнитного момента они будут тормозиться магнитным полем, прежде чем достигнут поверхности катода.

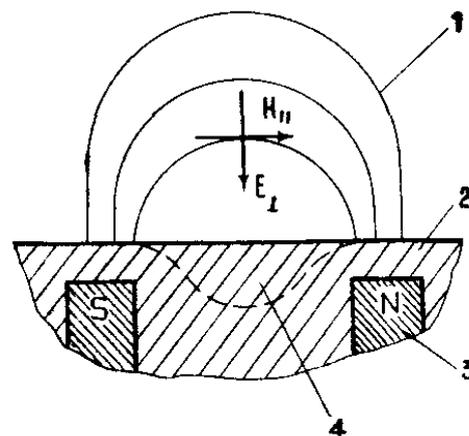


Рис.2 Структура магнитного поля магнетрона[3]:

1 – магнитные силовые линии, 2 – катод, 3 – магнитные полюса, 4 – зона эрозии катода[3]

Дрейфующие в скрещенных полях ионы плазмы в результате столкновении с атомами нейтрального газа увлекают последние во вращение до скоростей, почти совпадающих со скоростями дрейфа ионов (плазмы).

### 2.3. Вольтамперные характеристики МРС

Магнетроны в режиме постоянного тока обычно работают при давлении аргона  $0,3 - 1,3 \text{ Па}$  ( $10^{-2} - 10^{-3} \text{ мм.рт. ст.}$ ). И катодном потенциале  $300-700 \text{ В}$ .

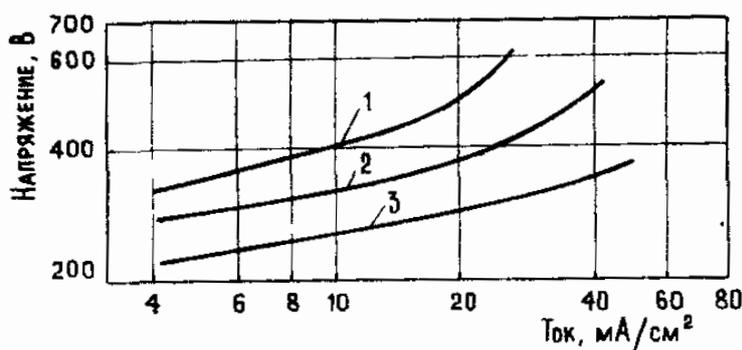


Рис.3 ВАХ для различных давлений аргона в магнетроне[3]:  
1 –  $10 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ ; 2 –  $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ ; 3 –  $1,3 \text{ Па}$ ;

При этих условиях плотность тока изменяется от  $4$  до  $60 \text{ мА/см}^2$ , а плотность мощности от  $1$  до  $36 \text{ Вт/см}^2$ . Типичные вольтамперные характеристики при различных давлениях в планарном магнетроне приведены на рис.3 (Плотность тока в зоне эрозии мишени может быть в  $4$  раза выше средней плотности тока, приведенной на

рис?). Для оптимальных значений формы и интенсивности магнитного поля кривые, приведенные на рис.3, удовлетворяют уравнению:

$$I = KU^n \quad (1)$$

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

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

При постоянной напряженности магнитного поля изменение напряжения в зависимости от давления также в широком диапазоне носит линейный характер. При низких рабочих давлениях также наблюдается резкое возрастание напряжения [3].

## 3. Экспериментальная установка

### 3.1. Описание установки

Вакуумная камера (рис.4) состоит из двух отсеков, соединенных вакуумным затвором (шибером). Первый отсек является рабочей камерой, в которой находится магнетрон, подложка и ионный источник. Данная камера

предварительно откачивается форвакуумным насосом. Второй отсек представляет собой вакуумную станцию, где установлены два турбомолекулярных насоса. После достижения внутри вакуумной камеры и вакуумной станции определенных значений давления, открывается шибер, и вакуумная камера откачивается до более глубокого вакуума (до  $10^{-4}$  Па) через вакуумную станцию.

Внутри вакуумной камеры установлена МРС, над которой находится подложка на вращающемся шестигранном барабане. Барабан поворачивает подложку к ионному источнику для проведения предварительной очистки пучком ионов аргона. Охлаждение мишени и корпуса магнетрона происходит проточной водой, протекающей через трубки, расположенные внутри корпуса магнетрона.

В работе использовался биполярный источник питания АРЕL-М-1.5ВР-800-3 (ООО «Прикладная электроника», Томск). В таком источнике в паузе между импульсами отрицательного напряжения на катод магнетрона подается небольшое положительное напряжение и при этом на катод течет электронный ток, снимающий заряд с диэлектрических включений на катоде[5].

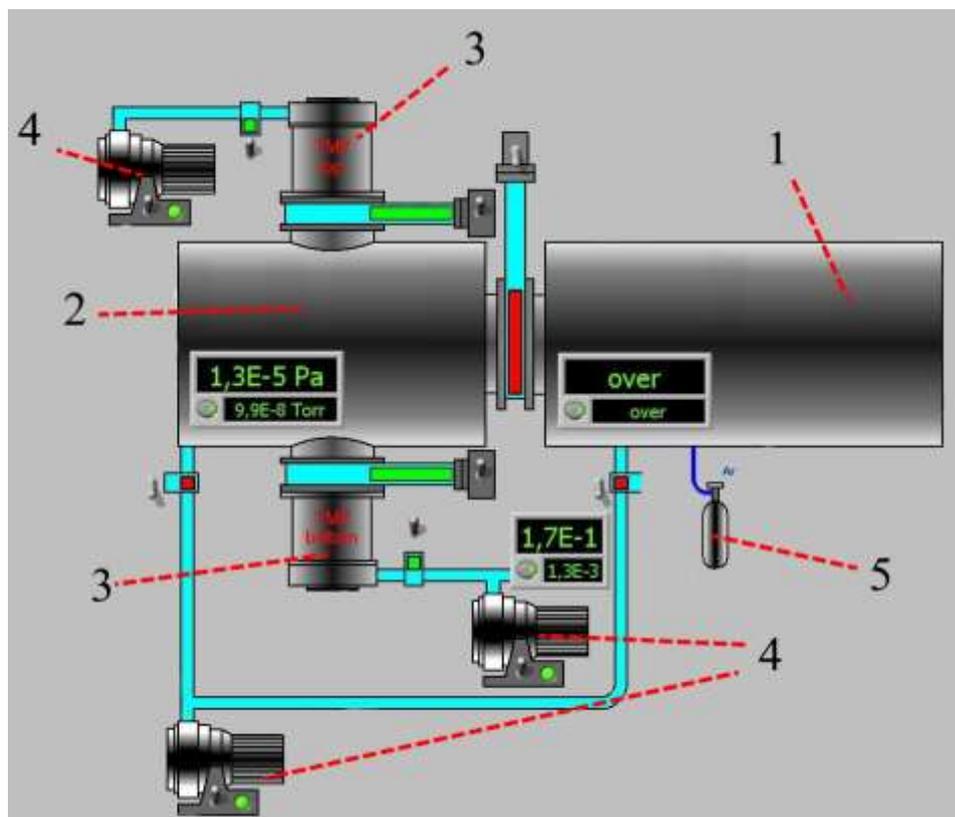


Рис.4 Экспериментальная установка

1 – рабочая камера; 2 – вакуумная станция; 3 – турбомолекулярный насос, 4 - форвакуумный насос; 5 – подача газа в рабочую камеру

Во время напыления на мишени магнетрона могут возникать микродуги, которые вырывают из поверхности мишени крупные (до нескольких сотен мкм) частицы, летящие на подложку. Если мишень металлическая, то крупные частицы могут лететь в расплавленном виде. Такие капли нарушают качество наносимого покрытия. Чтобы это предотвратить, данный источник работает в импульсном режиме.

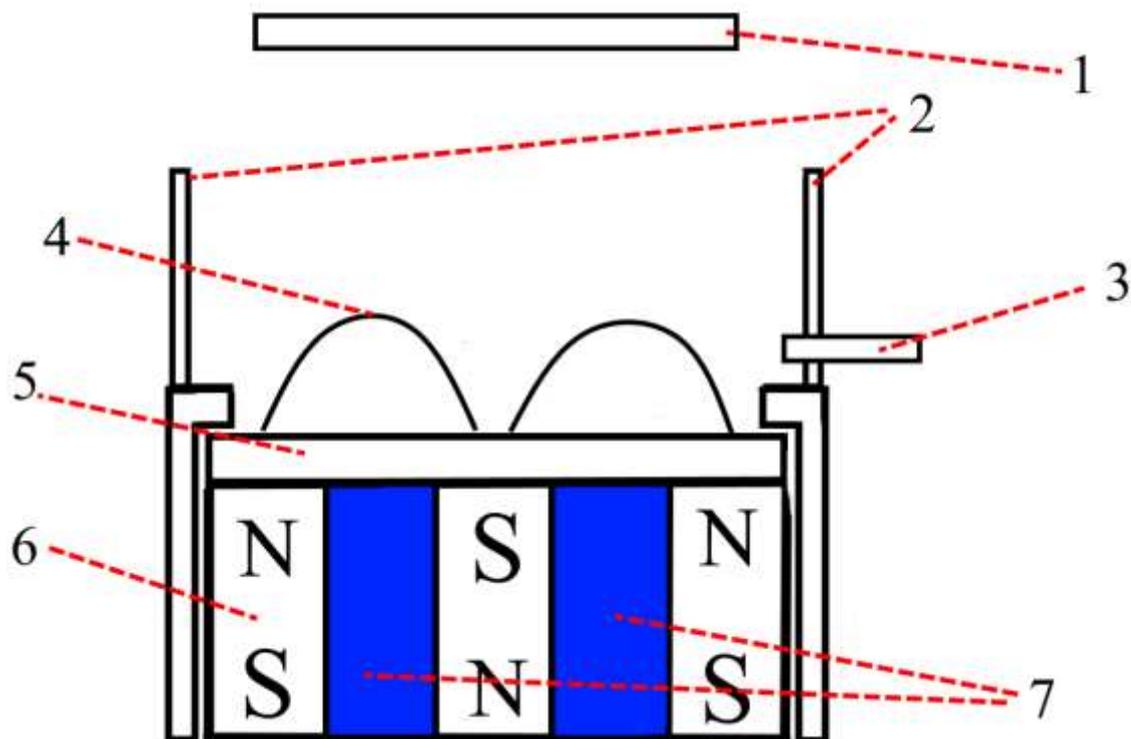


Рис.5 Схема МРС

1 – подложка; 2 –протяженный анод; 3 – трубка для подачи газа; 4 – линии магнитного поля; 5 – катод-мишень; 6 – электромагниты; 7 – резервуар для охлаждающей жидкости;

В эксперименте использовался магнетрон (рис. 5) с дополнительным протяженным анодом, имеющим форму цилиндра (диаметр основания анода 145 мм), который и являлся исследуемым граничным условием. Конструкция анодного узла позволяет подавать газ напрямую к мишени, локально увеличивая давление газа над ней. Тем самым газ не расходует впусую, как при внешнем напуске в камеру в случае классической МРС.

### 3.2.Проведение эксперимента

Эксперимент проводился в несколько этапов:

- Откачка рабочей камеры

Сначала форвакуумным насосом до давления порядка 10 Па откачивается рабочая камера. После этого магистраль форвакуумного насоса закрывается и открывается шибер между

вакуумной камерой и вакуумной станцией, внутри которой предварительно достигнуто давление  $10^{-5}$  Па. Вакуумная камера откачивается до давления  $2 \cdot 10^{-4}$  Па.

- Подготовка к эксперименту

После установления в камере необходимого значения давления через регулятор расхода газа происходит напуск аргона, подается охлаждение на МРС и включается источник питания МРС. На источнике устанавливается режим стабилизации по току.

- Эксперимент

Мы выбирали минимальное значение тока и расхода газа, при которых происходил пробой и зажигался магнетронный разряд. Такими значениями оказались 0,1 А и 60 мл/мин. Далее измерялись ВАХ при различных расходах аргона (от 60 мл/мин до 200 мл/мин) для каждого тока в диапазоне от 0,1 А до 1,9 А.

#### 4. Результаты и их обсуждения

В результате эксперимента были получены зависимости напряжения от расхода газа (рис.5), а также зависимость тока от напряжения (ВАХ) (рис.6) (с учётом погрешности используемого оборудования, которое составило 3% - для источника питания, 1% - для газового расходомера, 30% - для вакууметров).

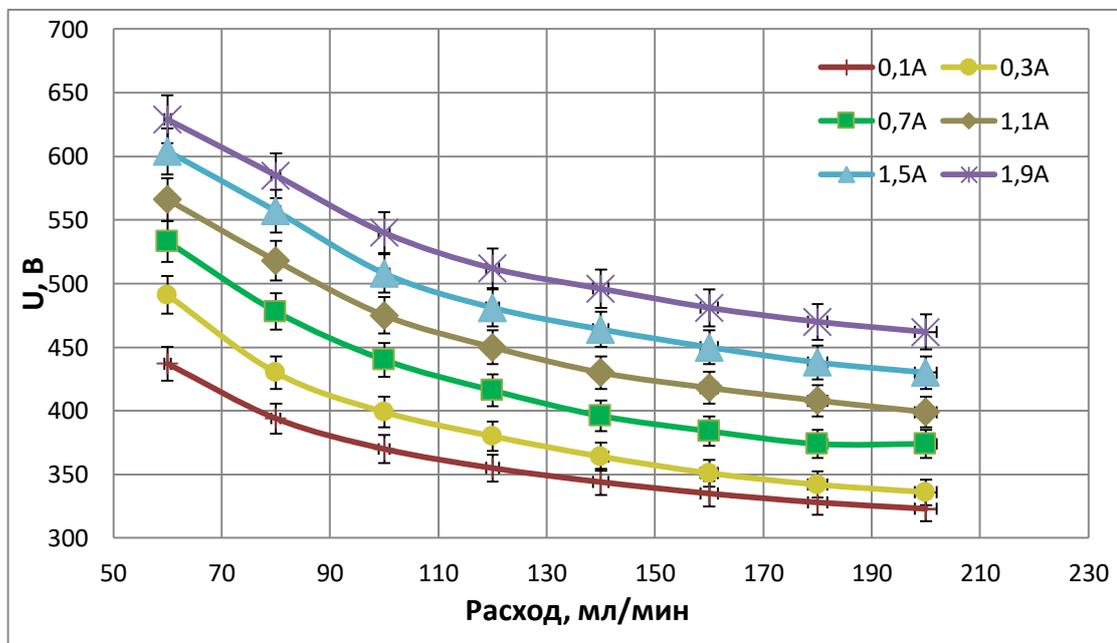


Рис.5 Зависимость напряжения разряда на аноде от расхода газа, при различных токах разряда

Из рис.5 видно, что все графики представляют собой степенную функцию, с различными показателями степени.

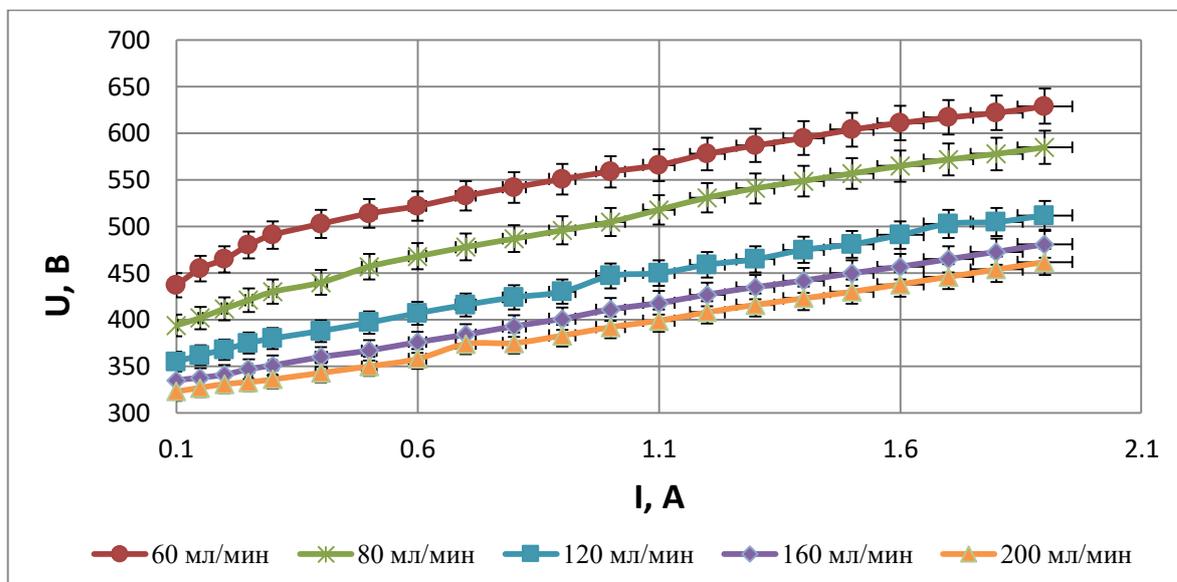


Рис.6 ВАХ при различных расходах газа

На рис.6 представлен ВАХ МРС, на котором прослеживается линейная зависимость  $I(U)$  при значениях тока от 0.7 А и выше. На основании данных кривых можно заключить, что при более высоком расходе газа для достижения одних и тех же значений силы тока требуется меньшее напряжение, чем при меньшем расходе газа. Следовательно, самая нижняя кривая (рис.6), соответствующая максимальному расходу газа, является более оптимальной с точки зрения энергозатрат для осуществления той же степени ионизации газа в МРС. Однако если оценивать эффективность МРС, следует учитывать формулу (1). Эта формула не совсем применима к данному эксперименту, поскольку она не учитывает граничные условия, которые были задействованы в этой работе. Поэтому при её использовании следует рассмотреть вольтамперные характеристики при малых токах (0,1А–0,7А) и малых расходах газа (60 мл/мин – 100 мл/мин)(Рис.7).

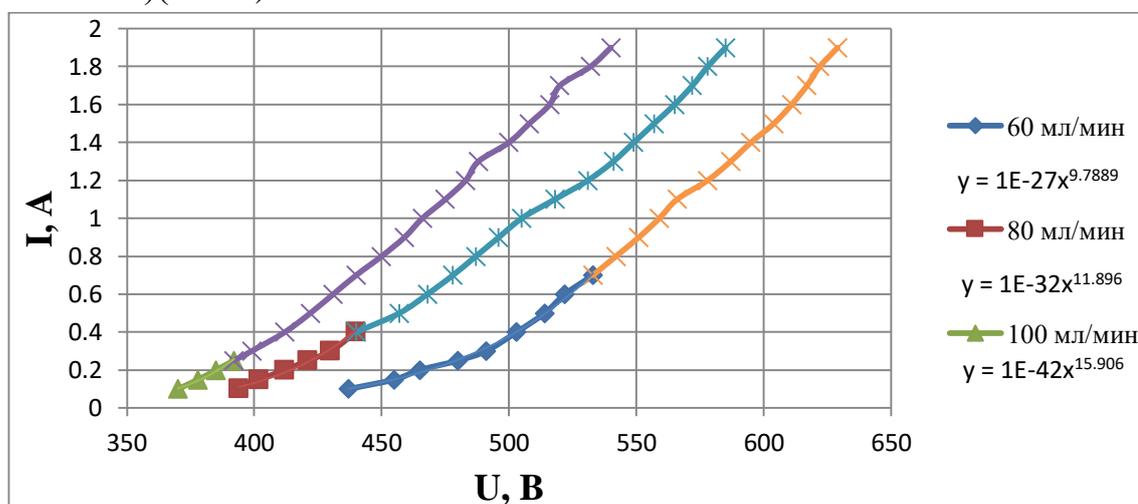


Рис.7 ВАХ МРС при малых расходах газа

Исходя из формулы (1), ВАХ МРС должен иметь степенной вид. Из рис.7 видно, что лишь часть графика при малых расходах, аппроксимируется с помощью степенной функции. И эта часть становится всё меньше при наибольших расходах газа. Заметим, что согласно формуле (1), показатель степени при аппроксимации является коэффициентом эффективности улавливания электронов магнитной ловушкой.

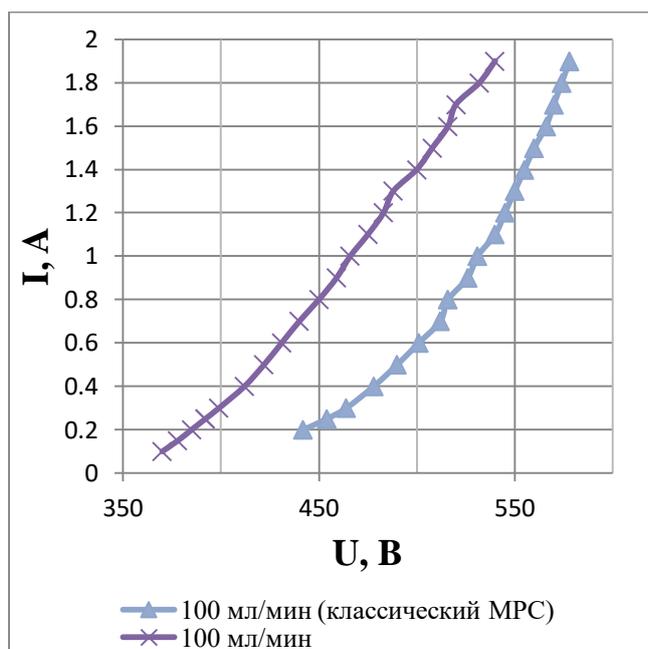


Рис.8а Сравнение ВАХ МРС классического типа и МРС с протяженным анодом при расходе 100 мл/мин

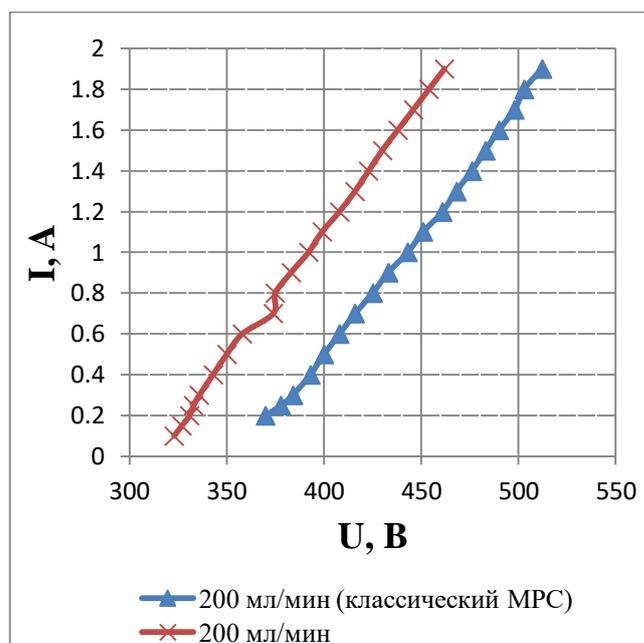


Рис.8б Сравнение ВАХ МРС классического типа и МРС с протяженным анодом при расходе 200 мл/мин

При сравнении двух графиков ВАХ для МРС классического типа (напуск газа в вакуумную камеру) и МРС с протяженным анодом и напуском газа в область мишени наблюдается смещение характеристики влево по оси напряжений для второго случая. Данное смещение объясняется увеличением энергоэффективности при любом расходе рабочего газа. На рис.8а для графика с классическим МРС наблюдается зависимость, согласующаяся с формулой (1), однако на рис.8б такого согласования уже не наблюдается. Следовательно, можно заключить, что в случае МРС с протяженным анодом эффективность улавливания электронов магнитной ловушкой выше именно при малых расходах. Однако при этом энергозатраты при работе МРС будут тоже выше.

## 5. Выводы

В ходе работы изучены вольтамперные характеристики магнетронно-распылительной системы с граничными условиями в виде протяженного анода. Проведено сравнение полученных ВАХ с ВАХ классической МРС. Определены

оптимальные параметры работы МРС с протяженным анодом для наименьших энергозатрат: оптимальный анодный ток (0,1 А - 0,6 А), оптимальный расход газа (200 мл/мин). Выявлены границы теории об эффективности улавливания электронов магнитной ловушкой для МРС с протяженным анодом.

## 6. Благодарности

Выражаю большую благодарность Золкину Александру Степановичу за помощь в выборе темы, а также за объяснение физических принципов работы магнетронно-распылительных систем. Выражаю благодарность Чепкасову Сергею Юрьевичу за консультации по МРС, за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов. Благодарю Эрфурт Анну, Курмачева Дмитрия и Буркова Андрея за помощь в проведении экспериментов и обработке результатов.

## 7. Литература

1. Рогов А.В., Капустин Ю.В., Мартыненко Ю.В. Факторы, определяющие эффективность магнетронного распыления. Критерии оптимизации // Журнал технической физики 2015. Т. 85, №2. с. 126 – 134.
2. W. D. Westwood, S. Maniv. The current – voltage characteristic of magnetron sputtering systems // J. Appl. Phys. 1983.vol. 54, n.12 pp. 6841 – 6846.
3. Дружков С.С. Математическое моделирование процесса магнетронного распыления // Вестник УГАТУ 2013. Т. 17, №8(61). с. 137 – 142.
4. Минайчев В.Е., Одинокое В.В., Тюфаева Г.П. Магнетронные распылительные устройства (магнетроны) // Технология, организация производства и оборудование. 1979. №8(659)
5. В.О. Оскирко, В.Д. Семенов, А.П. Павлов Исследование формирователя биполярных импульсов для питания магнетронных распылительных систем // Доклады ТУСУРа, 2015.№3 (37). С. 39 – 45.