

На правах рукописи



Черкасов Александр Алексеевич

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ РАЗРЯД
С ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ПЛАЗМЫ ВАКУУМНОЙ ДУГИ
ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ И ГЕНЕРАЦИИ ИОННЫХ ПУЧКОВ**

Специальность 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ТОМСК – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Научный руководитель: **Шандриков Максим Валентинович**
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Сахаров Юрий Владимирович**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ФГАОУ ВО «ТУСУР»), профессор кафедры физической электроники, г. Томск.

Казиев Андрей Викторович
кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», доцент кафедры физики плазмы (№21), г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита состоится «12» декабря 2025 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.115.02 (Д 003.031.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН) по адресу: 634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭ СО РАН и на сайте: https://hcei.tsc.ru/dissertations/kandidatskie-dissertatsii/2025_kand/cherkasov-aleksandr-alekseevich_diss/

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук



Г. Е. Озур

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время планарные магнетронные распылительные системы являются наиболее распространёнными устройствами для нанесения тонких пленок, использующихся в качестве износостойких покрытий, пленок на оптических элементах, металлизации интегральных схем и многих других приложениях. В тоже время, возрастающая потребность в новых и более качественных покрытиях требует дальнейшего совершенствования магнетронных распылительных систем. Одним из наиболее важных и перспективных направлений исследований остается реализация устойчивого функционирования магнетронного разряда в области более низкого рабочего давления при сохранении скорости напыления. Снижение рабочего давления позволяет уменьшить количество транспортных потерь распылённых атомов и тем самым увеличить энергетическую эффективность процесса осаждения, а также повысить энергетическое воздействие на подложку в процессе осаждения покрытия. Ранее в лаборатории плазменных источников Института сильноточной электроники (ИСЭ) СО РАН было продемонстрировано, что наиболее эффективным способом снижения рабочего давления магнетронного разряда является дополнительная инжекция в магнетронный разряд электронов, ускоренных в его прикатодном слое. На момент начала представляемой работы такая система была исследована только в относительно слаботочном (до 1 А) непрерывном режиме. В таком разряде степень ионизации распыляемого материала не превышает единиц процентов, а плазма состоит преимущественно из ионов рабочего газа.

В исследуемом последние два десятилетия сильноточном импульсном магнетронном разряде (т.н. HIPIMS - High Power Impulse Magnetron Sputtering) концентрация плазмы практически на два порядка превышает концентрацию в непрерывном режиме. В этом случае, поток материала распыляемой мишени находится в частично ионизованном состоянии, что позволяет за счет использования дополнительного электрического смещения подложки регулировать энергию поступающих на подложку частиц. Это, в свою очередь, позволяет управлять структурой и свойствами осаждаемого покрытия. В типичном диапазоне рабочего давления магнетронных распылительных систем (0,1 Па и выше) длина свободного пробега частиц материала мишени соизмерима или даже меньше характерных расстояний от распыляемой мишени до подложки либо экстрактора, что снижает преимущества режима HIPIMS. Столкновительный характер движения атомов и ионов материала мишени в пространстве дрейфа приводит к снижению ионного тока на подложку в результате перезарядки, уменьшению энергии частиц и их транспортным потерям, что негативно сказывается на

качестве осаждаемых покрытий и энергетической эффективности процесса магнетронного напыления.

Относительно высокая степень ионизации материала катода и рабочего газа позволяет в перспективе использовать сильноточный магнетронный разряд также в качестве генератора плазмы в ионных источниках. Однако в стандартном диапазоне рабочего давления из-за близости параметра $p \cdot d$ к минимуму кривой Пашена, возможность приложения высокого ускоряющего ионы напряжения ограничена электрической прочностью ускоряющего промежутка.

Обеспечение устойчивого функционирования сильноточного (несколько десятков ампер) импульсного магнетронного разряда в области низких значений рабочего давления (ниже 0,1 Па) является актуальной задачей и позволяет реализовать бесстолкновительный (или баллистический) режим движения распыленных атомов и ионов материала мишени, а также обеспечивает переход разряда в т.н. режим самораспыления, в котором доля ионов металла в плазме становится преобладающей. Такой переход обеспечивает положительное изменение условий осаждения, как с точки зрения повышения качества покрытий, так и получения новых функциональных покрытий с улучшенными свойствами.

В магнетронном разряде с инжекцией электронов реализация сильноточного режима магнетронного разряда предполагает и соответствующие повышение тока инжекции электронов. Необходимость повышения тока инжекции электронов делает целесообразным использование в сильноточном импульсном режиме магнетрона инжекции электронов из плазмы вакуумной дуги. Поскольку вакуумная дуга не требует напуска рабочего газа, то использование для инжекции электронов вакуумного дугового эмиттера также будет способствовать снижению рабочего давления магнетронной распылительной системы.

Цель диссертационной работы заключается в реализации и комплексном исследовании сильноточного импульсного магнетронного разряда в планарной геометрии электродов с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги применительно к использованию данной разрядной системы для осаждения покрытий и генерации ионных пучков.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **основных задач**:

1. Исследование влияния дополнительной инжекции электронов из плазмы импульсного вакуумного дугового разряда, ускоренных в катодном слое магнетронного разряда, на параметры и условия функционирования сильноточного импульсного магнетронного разряда в режиме самораспыления в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па).

2. Определение оптимальной конфигурации магнетронной разрядной

системы для достижения минимального рабочего давления и стабильного функционирования магнетронного разряда в сильноточной форме, а также для увеличения скорости роста и качества осаждаемых покрытий.

3. Разработка и исследование ионного источника на основе сильноточного импульсного магнетронного разряда с инжекцией электронов. Измерение и оптимизация рабочих параметров источника, проведение ионной имплантации различных материалов и изделий ионами, как газа, так и металла.

Научная новизна исследований заключается в том, что впервые:

1. Реализован и детально исследован сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги, функционирующий в режиме самораспыления, в области низкого рабочего давления (вплоть до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Па).

2. Определена оптимальная конфигурация магнетронной разрядной системы с инжекцией электронов для достижения стабильного функционирования сильноточной формы разряда в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па), а также для увеличения скорости и качества осаждаемых покрытий.

3. На основе сильноточного импульсного магнетронного разряда с инжекцией электронов разработан источник ионов, обеспечивающий рабочие режимы как с преобладанием в пучке ионов металла (режим самораспыления), так и с преобладанием ионов газа (нераспыляющий режим), а также комбинированные газо-металлические режимы с различным соотношением доли ионов газа и металла. Исследованы рабочие характеристики такого ионного источника.

Научная и практическая ценность заключается в том, что:

1. Результаты проведенных исследований вносят вклад в понимание физических процессов устойчивого функционирования сильноточного импульсного магнетронного разряда с инжекцией электронов при пониженных давлениях. Они также могут быть использованы в иных разрядных системах, для которых требуется снижение рабочего давления.

2. Достигнутое снижение рабочего давления сильноточного импульсного магнетронного разряда с инжекцией электронов обеспечивает, наряду с более высокой скоростью осаждения, улучшение качества покрытий.

3. Созданный на основе исследуемой разрядной системы ионный источник может быть эффективно использован для модификации поверхностных слоёв материалов и изделий комбинированными газо-металлическими ионными пучками с регулируемым долевым соотношением ионных компонентов и высокой плотностью тока (до 4 mA/cm^2).

Методология и методы исследования. Для достижения цели и решения поставленных задач работы использовались различные методы

диагностики параметров плазмы магнетронного разряда: зондовая диагностика, исследования масс-зарядового ионного состава с использованием квадрупольного и времяпролетного спектрометров. Для исследования свойств и характеристик напыляемых покрытий использовалась, атомно-силовая микроскопия (АСМ), рентгенофазовый анализ (РФА), растровая электронная микроскопия (РЭМ).

По результатам исследований, на защиту выносятся следующие **научные положения**:

1. Инжекция электронов из плазмы импульсной вакуумной дуги и их ускорение в катодном падении потенциала магнетронного разряда обеспечивает стабильное функционирование магнетронного разряда в сильноточном импульсном режиме в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па). При этом использование электродной системы вакуумно-дугового плазменного эмиттера с центральным иницирующим и внешним кольцевым катодом обеспечивает двукратное увеличение ресурса эмиттера.

2. Снижение рабочего давления в сильноточной импульсной магнетронной распылительной системе обеспечивает для материалов распыляемой мишени магнетрона, для которых реализуется режим самораспыления (Cu, Cr, Zr и др.), увеличение скорости напыления покрытий в 1,3–1,7 раза, а также снижение шероховатости поверхности покрытий и их более высокие адгезионные свойства. Увеличение тока инжекции в режиме стабилизации напряжения горения магнетронного разряда способствует увеличению концентрации генерируемой плазмы и плотности ионного тока на подложку, что в свою очередь, приводит к увеличению плотности и степени кристалличности напыляемого покрытия.

3. В сильноточном импульсном магнетронном разряде с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги долевое соотношение между током инжекции электронов и током разряда определяет напряжение горения разряда, которое, в свою очередь, оказывает влияние на ионный состав разрядной плазмы со степенью варьирования доли ионов металла от нулевого значения в нераспыляющем режиме до 90 % в режиме самораспыления. При функционировании такого разряда в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па) обеспечивается возможность его использования в источнике широкоапертурных пучков ионов газов и металлов, перспективном для модификации поверхностных свойств материалов.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием дублирующих методик, сопоставлением экспериментальных результатов и численных оценок, сравнением результатов экспериментов с результатами других исследователей, а так же практической реализацией научных положений и выводов при создании конкретных устройств.

Материалы диссертационной работы опубликованы в восьми статьях в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» или учитываемых в библиографических базах данных научного цитирования Web of Science и Scopus.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на 8-м и 9-м Международном конгрессе по потокам энергии и радиационным эффектам (EFRE) (Томск, Россия, 2022 г., 2024 г.); на 10-й международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, Россия, 2023 г.); на 7-м международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника» (Республика Бурятия, Россия, 2023 г.); на 16-й международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (Уфа, Россия, 2023 г.); на 5-м научно-техническом семинаре по электронно-пучковому оборудованию и технологиям (Новосибирск, Россия, 2024 г.); на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии» (Санкт-Петербург, Россия, 2025 г.); на 15-й и 17-й международной конференции «Газоразрядная плазма и ее применения» (Екатеринбург, Россия, 2021 г., 2025 г.).

Личный вклад автора заключается в комплексном исследовании сильноточного импульсного магнетронного разряда с дополнительной инжекцией электронов. Выдвигаемые научные положения, а также основные выводы по работе, были сделаны автором диссертации лично. Обсуждение задач исследования и методов их решения осуществлялось совместно с научным руководителем к.т.н. М.В. Шандриковым, с учетом рекомендаций д.т.н., профессора Е.М. Окса. Проведение отдельных экспериментов и обсуждение их результатов осуществлялись при участии соавторов, фамилии которых указаны в списке опубликованных по теме диссертации работах.

Диссертационная работа выполнялась в Институте сильноточной электроники СО РАН, в лаборатории плазменных источников. Исследования по тематике диссертации проводились в рамках Государственного задания ИСЭ СО РАН, проект FWRM-2021-0006, а также были поддержаны грантами РНФ № 21-19-00136 и № 24-19-00031.

Автор диссертационной работы был удостоен стипендии Президента Российской Федерации для аспирантов и адъюнктов, проводящих научные исследования в рамках реализации приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 122 страницах, содержит 87 рисунков и 3 таблицы. Список

литературы включает 121 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность, формулируются цель и задачи диссертационной работы, приведены защищаемые научные положения, отмечены научная новизна, научная и практическая ценность.

Первая глава посвящена анализу существующих на сегодняшний день, методов снижения рабочего давления магнетронных распылительных систем. Показано, что наиболее энергетически эффективным способом снижения рабочего давления магнетронной распылительной системы является инжекция дополнительных электронов из эмиттерного разряда с тыльной стороны катода магнетрона. Данный подход обеспечивает ускорение инжектируемых электронов в катодном слое магнетронного разряда и, как следствие, их высокую ионизационную способность, что в конечном итоге играет ключевую роль в возможности снижения рабочего давления магнетрона. Показано, что для дальнейшего снижения рабочего давления и увеличения тока инжектируемых электронов целесообразно использовать эмиттер на основе вакуумного дугового разряда. Так же в первой главе рассматриваются системы ионных источников газа и металла для проведения ионной имплантации. Высокая степень ионизации металла в импульсной сильноточной форме магнетронного разряда (режим HIPIMS) позволяет рассматривать возможность использования планарного магнетрона в ионных источниках, однако, для формирования широкоапертурных ионных пучков необходимо как минимум на порядок снизить давление прежде всего в области магнетронного разряда. В заключении главы сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена методике и технике эксперимента. Представлена и детально описана исследуемая разрядная система (рисунок 1) на основе планарного магнетрона с эмиттером электронов на основе вакуумного дугового разряда, расположенного с обратной стороны мишени магнетрона. Диаметр мишени магнетрона l составлял 125 мм. Толщина мишени в зависимости от задач эксперимента и типа мишени варьировалась от 1 до 5 мм. Инжекция электронов осуществлялась через эмиссионное отверстие b , выполненное в центре мишени магнетрона. Диаметр эмиссионной апертуры составлял от 1 до 3 мм. Положительный потенциал эмиттерного разряда прикладывался к мишени магнетрона (катод магнетронного разряда и анод эмиттерного разряда одновременно). Инжектируемые из плазмы эмиттера электроны попадали в прикатодный слой магнетронного разряда и ускорялись в нем, как и электроны, выбитые с поверхности мишени в результате вторичной ион-электронной эмиссии. При

этом регулирование тока инжектируемых электронов осуществлялось путем изменения тока вакуумного дугового разряда. В качестве анода магнетронного разряда использовался кольцевой электрод 2. Для более эффективного использования энергии инжектированных электронов использовался отражательный электрод 3, находящийся под отрицательным потенциалом мишени.

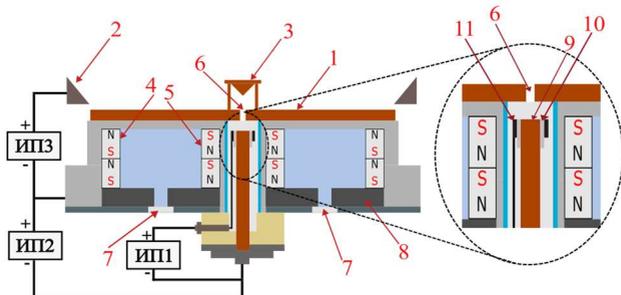


Рисунок 1 – Схема разрядной системы на основе планарного магнетрона с инжекцией электронов в катодный слой из плазмы вакуумной дуги: 1 – мишень магнетрона (катод); 2 – анод магнетрона; 3 – отражательный электрод; 4 – внешняя кольцевая магнитная система; 5 – внутренний кольцевой магнит; 6 – эмиссионная апертура в мишени магнетрона; 7 – вход и выход водяного охлаждения; 8 – магнитопровод; 9 – катод вакуумной дуги; 10 – керамический изолятор; 11 – кольцевой иницирующий электрод. Источники питания: ИП1 – иницирующего разряда; ИП2 – вакуумной дуги; ИП3 – магнетронного разряда

Для увеличения ресурса эмиттера была разработана и испытана инвертированная схема катодного узла вакуумного дугового разряда. Вместо кольцевого иницирующего электрода был использован центральный стержневой. Такой электрод имеет меньшую площадь и позволяет использовать керамические изоляторы меньшего размера без ухудшения стабильности срабатывания импульсов иницирующей плазмы. В свою очередь, за счет уменьшения торцевой площади, ранее занимаемой кольцевыми иницирующим электродом и керамическим изолятором, площадь рабочей поверхности катода вакуумной дуги увеличилась с 28 до 85 мм², а период обслуживания катодного узла увеличился минимум в два раза.

Представлено детальное описание методик измерения масс-зарядового состава плазмы магнетрона с помощью времяпролетного спектрометра и модифицированного квадрупольного масс-спектрометра типа RGA-200

(SRS). Дано описание зондовых методик, используемых для измерения локальных параметров плазмы магнетронного разряда.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию инъекции электронов из плазмы вакуумной дуги на параметры сильноточного импульсного магнетронного разряда.

Показано, что инъекция электронов позволяет кратно снизить рабочее давление сильноточного магнетронного разряда (рисунок 2). В области низкого рабочего давления инъекция дополнительных электронов в разрядный промежуток магнетрона обеспечивает стабильность инициирования магнетронного разряда и сокращает время выхода тока разряда на максимальное значение с 70 до 30 мкс (рисунок 3).

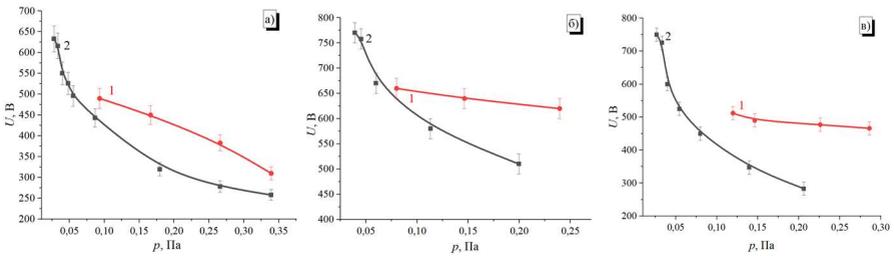


Рисунок 2 – Зависимость напряжения горения магнетронного разряда при снижении рабочего давления. Материал мишени и ток магнетронного разряда: а) цирконий, 70 А; б) тантал, 60 А; в) хром, 30 А.

Ток инжектированных электронов: 1 – 0,2 А; 2 – 1,3 А

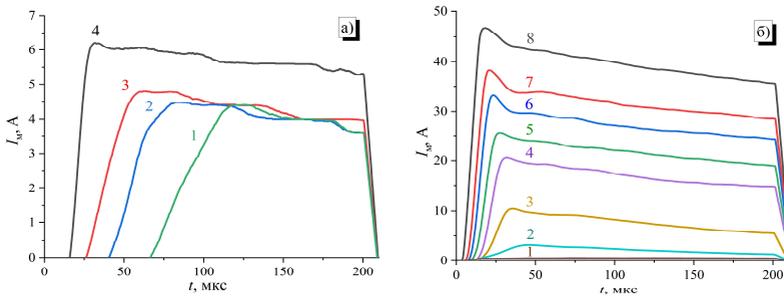


Рисунок 3 – Осциллограммы импульсов тока магнетронного разряда. Ток инжектированных электронов 0,2 А (а), рабочее давление: 1 – $8 \cdot 10^{-2}$ Па; 2 – $1,1 \cdot 10^{-1}$ Па; 3 – $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па; 4 – $2,7 \cdot 10^{-1}$ Па. Ток инжектированных электронов 1,6 А (б), рабочее давление: 1 – $2,7 \cdot 10^{-2}$ Па; 2 – $4 \cdot 10^{-2}$ Па; 3 – $5,3 \cdot 10^{-2}$ Па; 4 – $6,7 \cdot 10^{-2}$ Па; 5 – $8 \cdot 10^{-2}$ Па; 6 – $1,1 \cdot 10^{-1}$ Па; 7 – $1,3 \cdot 10^{-1}$ Па; 8 – $2,7 \cdot 10^{-1}$ Па. Материал мишени – медь, напряжение магнетрона 470 В

Инжекция в катодный слой магнетронного разряда электронов, осуществляющих дополнительную ионизацию, позволяет опционально либо увеличивать ток магнетронного разряда при стабилизации напряжения разряда (рисунок 4а), либо снижать требуемое для поддержания разряда напряжение при стабилизации тока разряда на заданной величине (рисунок 4б).

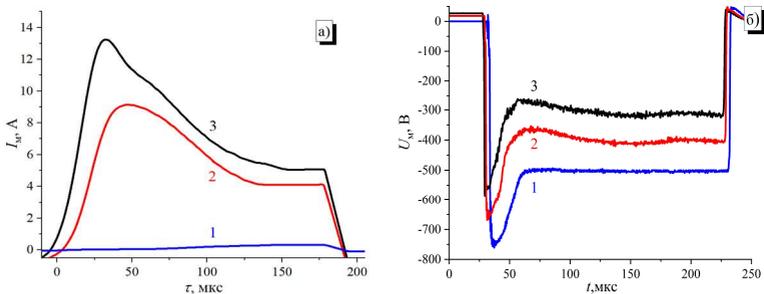


Рисунок 4 – Осциллограммы импульсов тока магнетрона (напряжение магнетрона 460 В, рабочее давление $5,4 \cdot 10^{-2}$ Па (а). Осциллограммы импульсов напряжения магнетрона (ток магнетрона 20 А, рабочее давление $1,9 \cdot 10^{-1}$ Па (б). Ток инжектированных электронов: 1 – 0,2 А; 2 – 0,8 А; 3 – 1,6 А

Показано, что в области низкого рабочего давления предпочтительным является функционирование магнетронного разряда в режиме стабилизации тока разряда. В этом случае, снижение концентрации нейтралов рабочего газа компенсируется повышенной ионизационной способностью электронов, как вторичных, так и инжектированных, в результате повышения установившегося напряжения горения и, соответственно, катодного падения магнетронного разряда. Это, в свою очередь, обеспечивает увеличение коэффициента ионного распыления мишени и скорости осаждения покрытий.

Результаты исследования масс-зарядового состава ионов плазмы в режиме стабилизации тока магнетронного разряда (рисунок 5) показывают, что при уменьшении рабочего давления вплоть до минимального (0,025 Па), напряжение магнетронного разряда увеличивается на 200÷300 В, что обеспечивает поддержание высокой доли ионов металла (материала мишени) и условия для функционирования магнетронного разряда в режиме самораспыления. В этих условиях, доля ионов металла в плазме магнетрона даже при относительно низких значениях тока магнетронного разряда (менее 10 А) превышает 50 % и увеличивается при уменьшении рабочего давления.

Увеличение доли ионов металла в плазме магнетронного разряда коррелирует с увеличением его напряжения горения (рисунок 6).

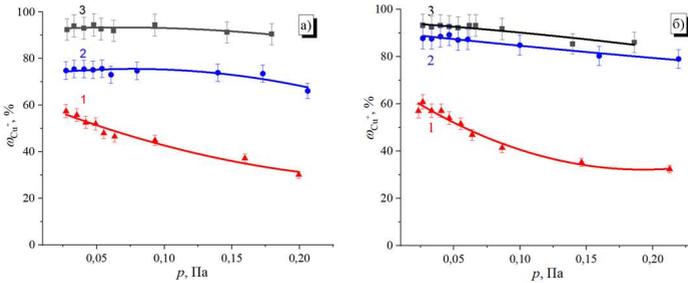


Рисунок 5 – Доля ионов меди в плазме магнетронного разряда в зависимости от рабочего давления для тока инжектированных электронов 2,3 А (а) и 5 А (б). Медь, ток магнетронного разряда: 1 – 5 А; 2 – 10 А; 3 – 20 А

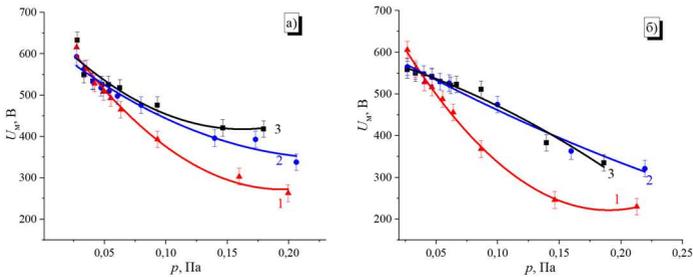


Рисунок 6 – Напряжение горения магнетронного разряда в зависимости от рабочего давления для тока инжектированных электронов 2,3 А (а) и 5 А (б). Медь, ток магнетронного разряда: 1 – 5 А; 2 – 10 А; 3 – 20 А

Результаты зондовых измерений показывают, что средняя температура электронов (в области анода магнетрона) составляет порядка 4 эВ и незначительно (порядка 1 эВ) увеличивается при наличии дополнительной инжекции электронов, но при этом практически не зависит от величины тока инжектированных электронов. В свою очередь, при постоянной величине тока инжекции и тока магнетронного разряда, с уменьшением рабочего давления с 0,4 до 0,04 Па средняя температура электронов ожидаемо увеличивается с 2,8 до 4,4 эВ, что связано как с увеличением напряжения горения магнетронного разряда, так и длины свободного пробега электронов до ионизации и, соответственно, снижением частоты ионизации до ухода электронов на анод.

Показано, что кратное снижение рабочего давления магнетронного разряда, обеспечивающее снижение эффекта перезарядки ионов, а также функционирование разряда при большем напряжении обеспечивают условия для генерации многозарядных ионов металла. На рисунке 7 показан характерный спектр ионов из плазмы магнетронного разряда при распылении циркониевой мишени. Ключевым отличием данного материала мишени, например, от меди, является более низкий коэффициент ионного распыления (0,75 ат./ион для циркония и 2,4 ат./ион для меди при энергии ионов аргона 600 эВ). При этом для циркониевой мишени наблюдается наличие ионов с максимальным зарядовым состоянием до 3+. Стоит отметить, что резкое увеличение тока двухзарядных ионов наблюдается именно в области низкого рабочего давления (рисунок 8). При этом ионы с зарядностью 3+ начинают наблюдаться только в области предельно низкого рабочего давления, уровня $4 \cdot 10^{-2} \div 5,3 \cdot 10^{-2}$ Па, являющегося нерабочим для типичных планарных магнетронов в HIPIMS режиме.

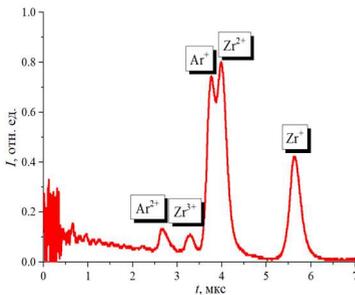


Рисунок 7 – Масс зарядовый состав плазмы магнетронного разряда.

Материал мишени – цирконий. Ток магнетрона 70 А, ток инжектированных электронов 1,5 А, напряжение магнетрона 466 В

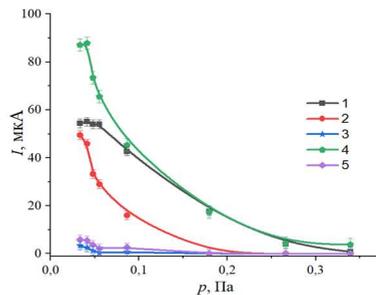


Рисунок 8 – Зависимость компонентов ионного тока от рабочего давления для циркониевой мишени. Ионные компоненты: 1 – Zr^+ ; 2 – Zr^{2+} ; 3 – Zr^{3+} ; 4 – Ar^+ ; 5 – Ar^{2+} . Ток магнетрона 70 А, ток инжектированных электронов 1,3А

Наличие независимого источника инжектированных электронов с регулируемым током дает возможность, посредством изменения параметров магнетронного разряда, получения плазмы в сильноточном импульсном режиме с высокой долей не только металлического ионного компонента, но и газового. Так, в режиме самораспыления в магнетронном разряде генерируется плазма с преобладанием металлического ионного компонента.

Увеличение тока инжекции позволяет реализовать магнетронный разряд в сильноточной форме (до 100 А) с достаточно низким напряжением (150–250 В), что позволяет снизить ионное распыление мишени и «примесь» ионов металла в плазме. Увеличение тока инжектированных электронов с целью снижения напряжения горения магнетрона может быть обеспечено либо путем увеличения тока вакуумного дугового разряда, либо увеличением площади эмиссионной апертуры.

Так, например, при функционировании магнетронного разряда в области предельно низкого рабочего давления ($2,7 \cdot 10^{-2}$ Па) с током инжектированных электронов 1,3 А обеспечиваются условия, в которых напряжение магнетронного разряда составляет 600 В, а доля ионов аргона в плазме составляет 49 %. Увеличение тока инжекции до 4,2 А обеспечивает снижение напряжения магнетронного разряда до 240 В. При этом доля ионов аргона в плазме увеличивается с 49 до 94 %.

В четвертой главе представлены примеры применения разработанной магнетронной системы с инжекцией электронов (рисунок 9) для формирования покрытий и ионных пучков. Показано, что при работе в режиме стабилизации напряжения горения в области типичного для классических магнетронных распылительных систем давления (0,3 Па) увеличение тока инжекции электронов приводит к увеличению скорости осаждения покрытий (в 2–4 раза), что связано с линейным ростом тока магнетронного разряда.

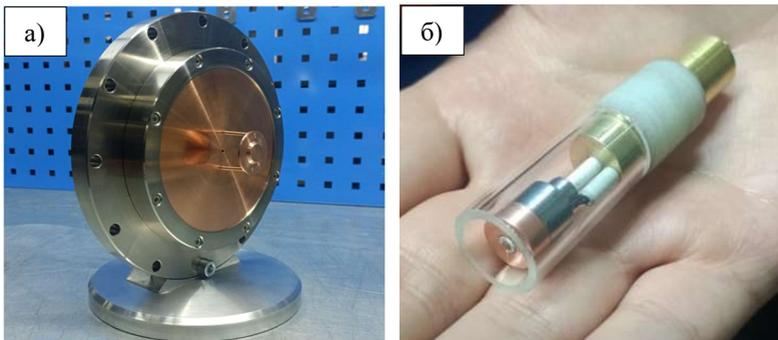


Рисунок 9 – Внешний вид разрядной системы на основе планарного магнетрона с инжекцией электронов (а) и катодного узла вакуумно-дугового эмиттера (б)

Покрытия, полученные в данных условиях, имеют тенденцию к увеличению плотности и степени кристалличности. Увеличение плотности

пленки с увеличением тока инжектированных электронов связано с ростом тока магнетронного разряда и, соответственно, концентрации плазмы, что в свою очередь способствует увеличению плотности ионного тока на подложку и удельной энергии на атом и, как следствие, увеличению их подвижности и плотности упаковки.

В режиме стабилизации тока магнетрона при снижении рабочего давления также отмечается увеличение скорости распыления для всех исследованных материалов мишеней магнетрона: медь, хром, цирконий (рисунок 10). При этом наблюдается строгая корреляция скорости напыления с напряжением разряда, в частности, в области предельно низких значений давления. Для медных пленок при снижении рабочего давления отмечено снижение шероховатости поверхности покрытий более, чем в 2 раза (рисунок 11).

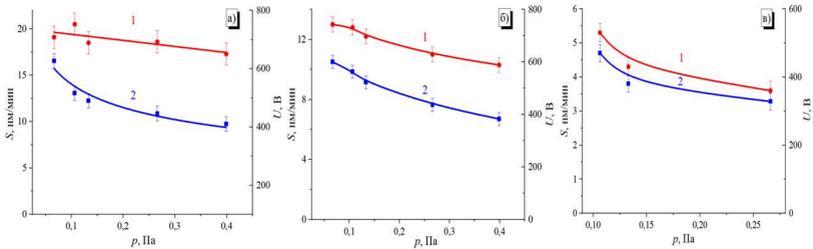


Рисунок 10 – Зависимость скорости осаждения (1) и напряжения магнетронного разряда (2) от рабочего давления. Материал мишени: а – медь; б – хром; в – цирконий. Ток магнетрона 15 А, ток инжектированных электронов 0,7 А

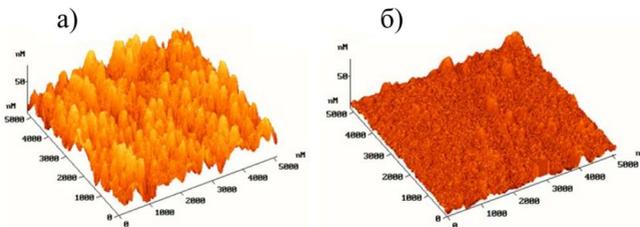


Рисунок 11 – 3D-изображение поверхности пленок меди в зависимости от давления рабочего газа в процессе магнетронного осаждения: а – 0,4 Па; б – 0,07 Па. Ток магнетронного разряда 15 А, ток инжектированных электронов 0,7 А

Разработанная разрядная система на основе сильноточного импульсного магнетронного разряда, функционирующего при рабочем давлении ниже $5 \cdot 10^{-2}$ Па, позволяет использовать ее в качестве генератора плазмы в источниках ионов как газа, так и металла (рисунок 12). Радиальное распределение плотности ионного тока по сечению пучка имеет колоколообразную форму, (рисунок 13 а). Эксперименты показали, что наличие отражательного электрода не оказывает заметного влияния на радиальное распределение, поскольку данный электрод расположен в стороне от основной области распыления и ионизации, из которой происходит распространение ионов в сторону эмиссионного электрода.

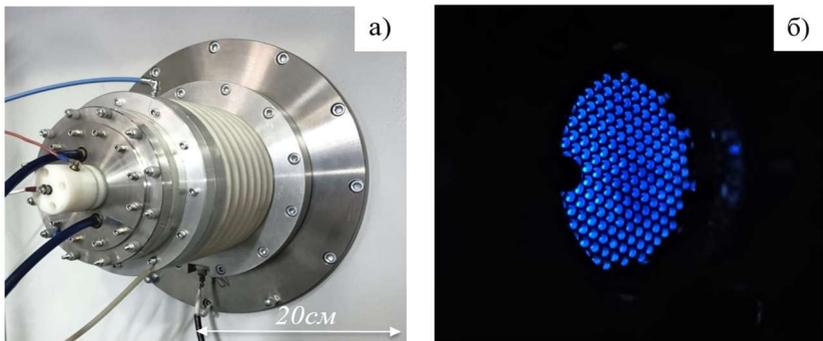


Рисунок 12 – Фотографии ионного источника на основе планарного магнетрона с инъекцией электронов из вакуумного дугового разряда (а) и свечения плазмы в области ионно-оптической системы (б)

Увеличение тока магнетронного разряда приводит к линейному увеличению плотности ионного тока пучка. При снижении рабочего давления в режиме стабилизации тока магнетронного разряда также наблюдается увеличение плотности тока ионного пучка (рисунок 13 б), обусловленное как ростом напряжения магнетронного разряда при переходе в область более низкого давления газа, так и снижением транспортных потерь ионов на процессах рассеяния и перезарядки.

Потенциальным способом увеличения эмиссионного тока ионного источника в такой системе является использование экспандера с отрицательным относительно анода магнетрона потенциалом. Такой подход обеспечивает дополнительную осцилляцию электронов в пространстве дрейфа распыленных атомов и их дополнительную ионизацию, позволяя увеличить извлекаемый ионный ток в $2 \div 4$ раза (рисунок 14 а). При этом важно отметить, что электрическое смещение экспандера практически не

меняет (не более 10 %) долевое отношение металлического и газового ионных компонентов (рисунок 14 б).

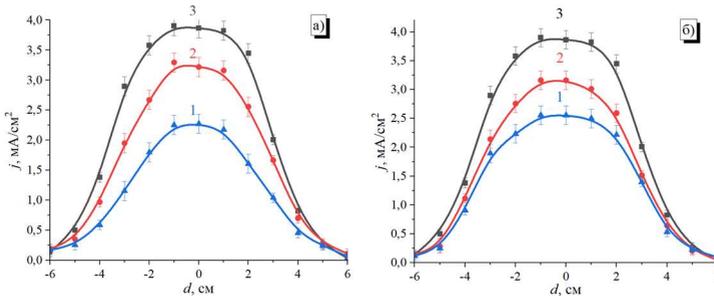


Рисунок 13 – Радиальное распределение плотности ионного тока пучка для различных значений тока магнетронного разряда в зависимости от тока магнетронного разряда (а): 1 – 40 А (415 В); 2 – 60 А (423 В); 3 – 80 А (566 В) (давление в области транспортировки пучка $0,8 \cdot 10^{-2}$ Па) и давления в области транспортировки пучка (б): 1 – $3 \cdot 10^{-2}$ Па (320 В); 2 – $1,9 \cdot 10^{-2}$ Па (450 В); 3 – $0,8 \cdot 10^{-2}$ Па (566 В) (ток магнетронного разряда 80 А). Циркониевая мишень, ускоряющее напряжение 22 кВ, рабочий газ – аргон

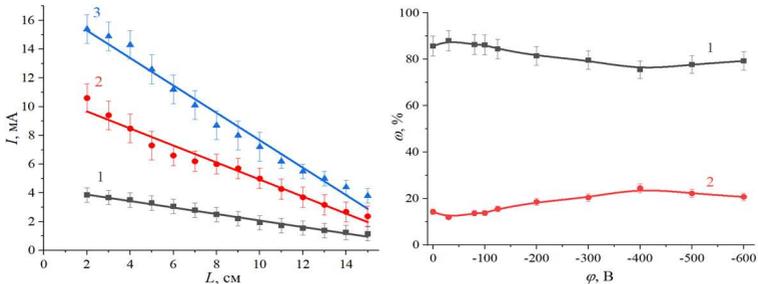


Рисунок 14 – Аксиальная зависимость ионного тока на коллектор в зависимости от электрического потенциала экспандера (а): 1 – 0 В; 2 – -90 В, 3 – -450 В и масс-зарядовый состав плазмы магнетронного разряда в зависимости от потенциала экспандера: 1 – доля ионов меди; 2 – доля ионов аргона.. Ток магнетронного разряда 500 мА, рабочее давление 0,4 Па

В конце главы представлены результаты применения ионного источника для имплантации ионами газа и металла образцов широкого класса материалов. Результаты проведенных исследований показали, что имплантация ионами хрома с энергией 30 кэВ авиационной стали ВСН-5 с экспозиционной дозой $1 \cdot 10^{17}$ ион/см² обеспечивает увеличение ее

коррозионной стойкости практически в 8 раз. Имплантация ионов азота с энергией 30 кэВ образцов синтетического алмаза (начиная с дозы $2 \cdot 10^{14}$ ион/см²) приводит к увеличению степени поглощения на длине волны 260±280 нм, что может свидетельствовать о формировании атомов замещения, которые, в свою очередь, могут быть использованы для последующего создания NV-центров. Имплантация поликапролактона ионами азота с энергией 30 кэВ с экспозиционной дозой выше $1 \cdot 10^{14}$ ион/см² способствует снижению краевого угла смачиваемости материала со 120 до 85–77 град.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе:

1) Инжекция электронов в катодный слой магнетронного разряда из плазмы вакуумно-дугового разряда позволяет обеспечить стабильное функционирование магнетронного разряда в сильноточной форме (десятки ампер) при давлении ниже 0,1 Па, где устойчивая сильноточная форма самостоятельного разряда не реализуется. Минимальное реализованное рабочее давление для сильноточной формы (до 100А) магнетронного разряда, составило $2,5 \cdot 10^{-2}$ Па.

2) В области предельно низкого рабочего давления при стабилизации тока магнетрона доля ионов материала мишени в режиме самораспыления достигает 90 %. Снижение рабочего давления сильноточного магнетронного разряда за счет дополнительной инжекции электронов создает условия для генерации многозарядных ионов в плазме магнетронного разряда для материалов мишени с коэффициентом распыления меньше 1. Для материалов мишени с коэффициентом распыления выше 1, наоборот, наблюдалось преобладание однозарядных ионов в плазме магнетронного разряда.

3) Изменение тока инжектированных электронов обеспечивает изменение напряжения горения магнетронного разряда, что в свою очередь позволяет реализовать в одной разрядной системе без изменения электродной конфигурации режимы как с преобладанием в плазме ионов материала мишени (т.н. «режим самораспыления»), так и с преобладанием ионов рабочего газа (т.н. «нераспыляющий режим»).

4) Снижение рабочего давления за счет инжекции электронов в процессе магнетронного распыления способствует увеличению скорости осаждения покрытий в 1,3÷1,7 раза, уменьшению шероховатости, и увеличению плотности покрытий.

5) Экспериментально показано, что магнетронная распылительная система с инжекцией электронов может быть использована в качестве источника ионов металла и газа с регулируемым долевым соотношением ионных компонентов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) Parameters and ion mass-to-charge composition of a high-power impulse magnetron discharge with electron injection / M. V. Shandrikov, **A. A. Cherkasov**, E. M. Oks, // Vacuum. – 2022. – Vol. 200. – С. 111056.
- 2) Low-pressure high-current pulsed magnetron discharge with electron injection from a vacuum arc plasma emitter / M. V. Shandrikov, **A. A. Cherkasov**, E. M. Oks, A. V. Vizir, D. B. Zolotukhin // Vacuum. – 2024. – Vol. 219. – P. 112721.
- 3) Low-pressure high-current magnetron discharge with electron injection: From self-sputtering with multiply charged metal ions to non-sputtering with “pure” gas ions / M. V. Shandrikov, **A. A. Cherkasov**, E. M. Oks, K. P. Savkin // Vacuum. – 2024. – Vol. 228. – P. 113512.
- 4) Corrosion Performance of Chemically Passivated and Ion Beam-Treated Austenitic–Martensitic Steel in the Marine Environment / V. Semin, **A. Cherkasov**, K. Savkin, M. Shandrikov, E. Khabibova // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2025. – Vol. 9. – №. 5. – P. 167.
- 5) Modified residual gas analyzer for measuring the ion mass-to-charge composition of a repetitively pulsed plasma / M. V. Shandrikov, **A. A. Cherkasov**, E. M. Oks, A. V. Vizir, // AIP Advances. – 2022. – Vol. 12. – №. 2.
- 6) High-Current Pulsed Planar Magnetron Discharge with Electron Injection / M. V. Shandrikov, **A. A. Cherkasov**, E. M. Oks // Plasma Physics Reports. – 2024. – Vol. 50. – №. 1. – P. 169-172.
- 7) Сильноточный импульсный магнетронный разряд низкого давления с инжекцией электронов из вакуумной дуги / М. В. Шандриков, А. В. Визирь, Е. М. Окс, **А. А. Черкасов** // Materials. Technologies. Design. – 2023. – Т. 5. – №. 3 (13). – С. 79-89.
- 8) Особенности инжекции электронов из плазмы эмиттерного разряда в планарную магнетронную расплывательную систему / М. В. Шандриков, Е. М. Окс, **А. А. Черкасов** // Прикладная физика. – 2022. – №. 3. – С. 17.