УТВЕРЖДАЮ
Директор
ФГБУН ИЭФ УрО РАН
д.ф.-м.н., член-корр. РАН,
С.А. Чайковский

«23» 10 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН) на диссертационную работу Черкасова Александра Алексеевича «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Актуальность темы. Магнетронное распыление является наиболее распространённым методом физического осаждения тонких пленок. Особый интерес последние несколько десятков лет представляет сильноточный импульсный магнетронный разряд т.н. HIPIMS («High Power Impulse Magnetron Sputtering»). Это связано с большей, по сравнению с непрерывном режимом работы, степенью ионизации распыленного материала мишени, что позволяет за счет дополнительного электрического смещения регулировать энергию поступающих на подложку частиц распыляемого металла. Это, в свою очередь, обеспечивает дополнительную возможность управления структурой и свойствами осаждаемого покрытия. В тоже время, рабочее давление таких систем составляет от 0,1 Па и выше. В таких условиях длина свободного пробега частиц материала мишени соизмерима или даже меньше характерных расстояний от распыляемой мишени до подложки либо экстрактора, что снижает преимущества режима HIPIMS. Столкновение частиц в пространстве между мишенью и подложкой приводит к снижению энергии атомов и ионов, поступающих на подложку, и их транспортным потерям, что отрицательно сказывается на качестве формируемого покрытия и энергетической эффективности системы в целом. Реализация устойчивого функционирования сильноточной (несколько десятков ампер) импульсной формы магнетронного разряда в области низких значений рабочего давления (ниже 0,1 Па) является актуальной задачей и позволяет реализовать бесстолкновительный (или баллистический) режим движения частиц материала распыляемой мишени до подложки, а также обеспечивает переход разряда в т.н. режим самораспыления, в котором доля ионов металла в плазме становится преобладающей.

Структура и содержание 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.

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

Первая глава посвящена обзору существующих на сегоднящний день методов снижения рабочего давления магнетронных распылительных систем. Показано, что наиболее эффективным способом снижения рабочего давления магнетрона является инжекция электронов в его разрядный промежуток с ускорением их в катодном слое магнетронного разряда. Представлена аргументация в пользу использования эмиттера электронов на основе вакуумного дугового разряда для дальнейшего снижения рабочего давления магнетрона. Рассмотрены ионные источники, позволяющие в одной разрядной системе генерировать пучки как ионов металла, так и ионов газа. Показано, что высокая степень ионизации распыленного материала в режиме HIPIMS позволяет рассматривать такие сильноточные импульсные магнетронные системы в качестве источника ионов. Однако, для увеличения эффективности транспортировки ионов необходимо снижение рабочего давления в таких разрядных системах. В заключении сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлена и детально описана исследуемая разрядная система. Показан вариант увеличения ресурса эмиттера на основе вакуумного дугового разряда для обеспечения увеличения продолжительности стабильного функционирования магнетронного разряда. Представлено описание используемых методик для анализа масс-зарядового состава плазмы и измерения локальных параметров плазмы магнетрона.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния инжекции электронов на параметры функционирования магнетронного разряда, в том числе в области низких значений рабочего давления (ниже 0,1 Па). Особое внимание уделено влиянию инжекции электронов на масс-зарядовый состав ионов плазмы магнетронного разряда. Показано, что изменение тока инжектированных электронов позволяет за счет изменения напряжения разряда получить в одной электродной системе как режим с преобладанием ионов металла, так и режим с преобладанием ионов рабочего газа.

В четвертой главе представлены результаты использования разработанной разрядной системы в качестве устройства для осаждения покрытий в области низкого рабочего давления, а также в качестве ионного источника для генерации пучков ионов газа и металла. Представлены результаты тестовых экспериментов ионной имплантации различных материалов.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

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

Научная новизна результатов диссертационной работы:

1. Автором работы разработан и исследован сильноточный (до 100 А) планарный магнетрон с дополнительной инжекцией электронов из эмиттера на основе вакуумного дугового разряда, расположенного с тыльной стороны мишени магнетрона. Определено, что

инжекция электронов и их ускорение в катодном падении магнетронного разряда обеспечивает стабильное функционированию магнетрона в области низкого рабочего давления (вплоть до $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ Па).

2. Определена оптимальная электродная конфигурация, обеспечивающая стабильное функционирование магнетрона в сильноточной форме при минимальном значении рабочего давления и обеспечивающая увеличение скорости осаждения покрытий.

3. Показано, что инжекция дополнительных электронов в широком диапазоне влияет на параметры функционирования магнетрона и, как следствие, ионный состав плазмы магнетрона. В результате в одной разрядной системе возможно реализовать как режим с преобладанием ионов рабочего газа (т.н. нераспыляющий режим), так и режим с преобладанием ионов материала мишени (т.н. режим самораспыления). Это, в совокупности с низким рабочим давлением, позволило использовать разработанную разрядную систему в качестве источника широкоапертурных пучков ионов газов и металлов, перспективном для модификации поверхностных свойств материалов.

Научная и практическая ценность заключается в том, что:

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. Достигнутое за счет дополнительной инжекцией электронов более низкое рабочее давление сильноточного импульсного магнетронного разряда обеспечивает увеличение скорости осаждения и качества осаждаемых покрытий. Ионный источник, разработанный на основе исследуемой разрядной системы, может быть использован для проведения модификации поверхности различных материалов комбинированными газо-металлическими ионными пучками с возможностью регулирования долевого соотношения ионных компонентов.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати.

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.

Таким образом, актуальность тематики, научная значимость, новизна и достоверность полученных результатов не вызывают сомнений. Автореферат и сама диссертация дает достаточно полное представление о приведённых автором исследованиях, а автореферат полностью соответствует структуре и содержанию диссертации.

Содержание диссертации соответствует специальности 2.2.1–вакуумная и плазменная электроника.

Оценка содержания диссертации, ее завершённость в целом

Диссертационная работа в целом производит впечатления цельного самостоятельного исследования. Научные положения и выводы достаточно аргументированы и являются значимыми для развития областей науки и техники, связанных

с физическим осаждением покрытий и созданием ионно-плазменных технологий модификации материалов.

Замечания по диссертации

1. На стр. 12 приводится сравнение сильноточного импульсного магнетронного разряда (СИМР) и HIPIMS режима. Однако при сравнении используются разные физические параметры, что затрудняет восприятие.
2. На стр. 79. автором диссертации утверждается, что снижение рабочего давления магнетронного разряда за счет дополнительной инжекции электронов обеспечивает условия для получения многозарядных ионов в плазме магнетронного разряда. Автор объясняет, что это связано с эффектом уменьшения транспортных потерь и перезарядки. Однако, данная формулировка является неясной и требует более детального разъяснения.
3. Стр. 88. На рисунке 4.8 приводится значения среднеквадратичной шероховатости покрытий. Однако на данном графике величина R составляет ~ 10 мкм, это больше толщины покрытий. В то же время соответствующие 3D-изображения на рисунке 4.9 представлены в другом масштабе с размером неоднородностей порядка 50 нм. Какова реальная величина?
4. Стр.91. говорится, что экспандер при токах магнетронного разряда выше 30 А перекрывался мелкоструктурной сеткой с геометрической прозрачностью 50 %. Утверждается что, многоапертурный электрод и мелкоструктурная сетка обеспечивали пятикратный перепад давления между областями генерации плазмы и ускорения ионов. Однако данная формулировка чересчур категорична. Области генерации плазмы и ускорения ионов разделены сеткой. Скачка давления в области сетки не возникает. Существует градиент давления газа за счет расширения потока в области ускорения ионов.
5. В разделе 4.2 (стр.88–103) автор приводит результаты облучения ионным пучком различных материалов и кратко сообщает о результатах модификации поверхности. Нет краткой постановки задач с обсуждением и ссылками на известные публикации. Непонятно, претендуют ли полученные результаты на новизну или это нужно воспринимать как доказательство дееспособности ионов, полученных данным методом. Например, автор упоминает NV-центры, не разъясняя цели исследования и важности поставленной задачи.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не затрагивают защищаемых научных положений и выводов по диссертации. Работа четко структурирована, в ней использован простой и понятный стиль изложения.

Диссертационная работа Черкасова А.А. «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков», представляет собой законченное исследование, в котором решается актуальная научно-техническая задача снижения рабочего давления сильноточного импульсного магнетронного разряда. Исследование проведено на высоком уровне и соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатской диссертации «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением

Правительства РФ, а сам Черкасов А.А. заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – вакуумная и плазменная электроника.

Отзыв составлен с учетом мнений и замечаний, высказанных на расширенном научном семинаре лаборатории пучков частиц Института электрофизики УрО РАН (протокол № 10 от 15.10.2025 г.).

Доктор технических наук
Член-корреспондент РАН — Гаврилов Н.В.

Гаврилов Николай Васильевич

доктор технических наук, член-корреспондент Российской академии наук, заведующий лабораторией пучков частиц Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН).

Почтовый адрес: 6200116, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

Телефон: 8 (343) 267-87-78, E-mail: gavrilov@iep.uran.ru.

Подпись Гаврилова Н.В. заверяю:
ученый секретарь ИЭФ УрО РАН
кандидат физико-математических наук
Телефон: 8 (343) 267-88-18
E-mail: kokorina@iep.uran.ru — Кокорина Е.Е.