

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию **Черкасова Александра Алексеевича «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков»**, представленной на соискании ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1.– вакуумная и плазменная электроника

Актуальность. Магнетронные распылительные системы (МРС) получили широкое распространение во всем мире. Их несомненным достоинством является высокое качество напыляемых покрытий по сравнению с другими методами, достаточная простота конструкции и высокая повторяемость результата. При этом осаждение покрытий методом магнетронного распыления на изделия с большой площадью поверхности, с высокой однородностью и низкой тепловой нагрузкой, требует размещения подложки на расстоянии от мишени не менее двух ее диаметров (для круглых магнетронов). При функционировании магнетронного разряда в типичном диапазоне рабочего давления уровня долей и единиц Па средняя длина пробега распыленных атомов оказывается в этом случае меньше характерных расстояний до подложки. Интенсивные столкновения в пространстве дрейфа приводят к рассеиванию потока атомов металла на подложку, снижая эффективность процесса, а также приводят к снижению энергии частиц, достигающих подложки, что отражается на качестве и структуре формируемого покрытия.

Снижение рабочих давлений благодаря предложенному ранее в ИСЭ СО РАН методу инжекции электронов с тыльной стороны мишени с ускорением их в катодном слое магнетронного разряда позволяет избавиться от указанных недостатков классических МРС, однако необходимость дополнительного газового питания эмиттера на основе тлеющего разряда с полым катодом до недавнего момента ограничивала достижение предельных рабочих давлений магнетрона.

С этой точки зрения переход от тлеющего разряда в эмиттере на вакуумно-дуговой, а также реализация сильноточной импульсной формы, для которой характерна высокая доля металлического компонента, обеспечивающая условия для перехода магнетронного разряда в режим самораспыления с высокой долей ионов металла в генерируемой плазме, представляется логичным и очевидным решением проблемы, а сама решаемая задача актуальной и перспективной.

Проведенные исследования позволили получить ряд **принципиально новых результатов**, среди которых необходимо отметить следующие:

1. Реализован и детально исследован сильноточный импульсный магнетронный разряд с инъекцией 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 инъекцией 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 напыляемых покрытий.

3. На основе сильноточного импульсного магнетронного разряда с инъекцией 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 регулируемым соотношением доли ионов газа и металла. Исследованы рабочие характеристики такого ионного источника.

Перечисленные результаты отражают научную новизну представляемой к защите диссертационной работы.

Практическая и научная значимость выполненной работы заключается в том, что проведенные исследования вносят вклад в понимание физических процессов и существенно расширяют диапазон рабочих параметров сильноточного импульсного магнетронного разряда при пониженных давлениях.

Экспериментально показано, что снижение рабочего давления сильноточного импульсного магнетронного разряда с инъекцией электронов обеспечивает, наряду с более высокой скоростью осаждения, улучшение качества покрытий.

Созданный на основе разработанной разрядной системы ионный источник не имеет аналогов и может представлять интерес для модификации поверхностных слоёв материалов и изделий комбинированными газо-металлическими ионными пучками с регулируемым долевым соотношением ионных компонентов и высокой плотностью тока.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы не вызывают сомнений. Эксперименты носят систематический характер и проведены с использованием современных методик, принятых в области электрофизических и плазменных исследований. Полученные промежуточные результаты находятся в хорошем согласии с результатами других исследователей. Положения, выводы и

рекомендации, сформулированные в диссертации, базируются на обширном экспериментальном материале, имеют физическое обоснование и практическую реализацию в виде конкретных устройств.

Основные результаты диссертационной работы достаточно полно изложены в статьях, опубликованных в известных международных высокорейтинговых журналах. Результаты работы неоднократно представлялись автором в виде устных докладов и обсуждались на различных конференциях.

К диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 2.2 обсуждается влияние потенциала смещения анода на измеряемые ионные потоки из плазмы, при этом отмечается, что потенциал плазмы около анода может иметь небольшую отрицательную величину. Однако, никак не обсуждаются механизмы формирования такой структуры потенциала. Известно, что для импульсных магнетронных разрядов характерны отрицательные значения потенциала в области наиболее плотной плазмы, но для анодной зоны это утверждение требует обоснования. С другой стороны, в работе применяется зондовая диагностика, в том числе с использованием зонда с охранным кольцом, данные с которого могли бы показать распределение потенциала в области экстракции ионов.
2. В разделе 3.2 утверждается, что «пределный ток, переносимый...за счет газовых нейтралов, ... не превышает 4–5 А». Эта формулировка требует корректировки, поскольку ток подразумевает движение заряженных частиц.
3. В разделе 3.2 делается акцент на то, что при снижении давления требуется применять режим стабилизации тока источника питания, при этом растет доля металлической ионной компоненты в потоке из плазмы. Однако, при таком режиме работы при снижении давления вместе с ростом напряжения увеличивается и мощность разряда. Поэтому сравнение экспериментальных значений на графиках зависимости параметров ионных потоков от давления не вполне оправдано. Также неясно, по какой причине в работе не применяется наиболее широко распространенный в индустрии режим стабилизации разряда по мощности.

4. В разделе 4.1, посвященном осаждению покрытий, нет информации о материале образцов и методах подготовки их поверхности перед экспериментами. Однако, эти параметры оказывают большое влияние на структуру и адгезию пленок.

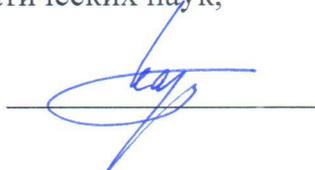
Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертация Черкасова А.А. является самостоятельной завершенной научной работой, а полученные им результаты имеют важное значение для дальнейшего развития физики и техники разрядных систем, используемых для осаждения покрытий и генерации ионных пучков.

Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, является решением важной и актуальной научно-технической задачи и полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Черкасов А.А. заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1. – вакуумная и плазменная электроника.

Официальный оппонент:

Доцент кафедры физики плазмы,
Кандидат физико-математических наук,

«25» ноября 2025 г.



Казиев Андрей Викторович

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.08 – Физика плазмы

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Адрес: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31
Тел.: +7 (495) 788 56 99, доб. 9616
Почта: avkaziev@mephi.ru

Подпись удостоверяю
А.А. Черкасов
отдела регистрации
и приказов НИЯУ МИФИ

