

О Т З Ы В

официального оппонента на диссертацию

Черкасова Александра Алексеевича

на тему: «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий

и генерации ионных пучков»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.1 – Вакуумная и плазменная электроника

Актуальность темы. Диссертация Черкасова А.А. на тему: «Сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги для осаждения покрытий и генерации ионных пучков» посвящена разработке и исследованию сильноточной импульсной магнетронной системы с инжекцией электронов, обеспечивающей устойчивое функционирование сильноточного импульсного магнетронного разряда в области низких значений рабочего давления. Это позволяет реализовать баллистический режим движения распыленных атомов и ионов материала мишени, а также обеспечивает возможность перехода разряда в режим самораспыления, в котором доля ионов металла в плазме является преобладающей. Такой переход обеспечивает положительное изменение условий осаждения, как с точки зрения повышения качества покрытий, так и с точки зрения расширения функциональных возможностей магнетронной системы и использования ее в качестве генератора плазмы для электронных или ионных ускорителей, в том числе для ионно-лучевых имплантеров.

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.

Научная новизна и практическая значимость исследований. В диссертации А.А. Черкасова представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

1. Результаты проведенных исследований существенный вносят вклад в понимание фундаментальных физических протекающих в сильноточных импульсных тлеющих разрядов с инжекцией электронов при пониженных давлениях.

2. Разработана физическая концепция создания оптимальной конфигурации магнетронной разрядной системы с инжекцией электронов для достижения стабильного функционирования сильноточной формы разряда в области низкого рабочего давления (вплоть до 0,025 Па).

3. Разработаны физические принципы и режимы работы сильноточной импульсной магнетронной системы с инжекцией электронов, 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.

4. Реализован и детально исследован сильноточный импульсный магнетронный разряд с инжекцией электронов из плазмы вакуумной дуги, функционирующий в режиме самораспыления, в области низкого рабочего давления (ниже 0,1 Па).

5. На основе сильноточного импульсного магнетронного разряда с инжекцией электронов разработан ионный источник; показана возможность его использования 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 подтверждается систематическим характером исследований, использованием различных дублирующих экспериментальных 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.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на VIII международной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения лауреата нобелевской премии по физике Басова Николая Геннадиевича, Москва, 2022; Международной научно-практической конференции. Электронные средства и системы управления. Томск, 2021; XVII международной научно-технической конференции Вакуумная техника, материалы и технология. Москва, 2023

Публикации по теме диссертации. 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:

1) 3 статьи в журнале *Vacuum* (журнал имеет раздел «Plasma science; advances in PVD, CVD, plasma-assisted CVD, ion sources, deposition processes and analysis», квартиль WoS – 2, квартиль Scopus – 1, уровень в белом списке – У1);

2) 1 статья в журнале *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (журнал специализируется в том числе и на проектировании оборудования или разработки инструментов для обработки материалов, оценки и контроля качества, квартиль WoS – 2, квартиль Scopus – 1, уровень в белом списке – У1);

3) 1 статья в журнале *AIP Advances* (журнал специализируется на всех областях физической науки, квартиль WoS – 4, квартиль Scopus – 3, уровень в белом списке – У2);

4) 1 статья в журнале Plasma Physics Reports (журнал целиком посвящен области физике плазмы, квартиль WoS – 4, квартиль Scopus – 4, уровень в белом списке – У3);

5) 1 статья в журнале Прикладная физика (журнал посвящен материалам, реализуемым с применением плазменных, электронно- и ионно-лучевых технологий получения, квартиль WoS – нет, квартиль Scopus – 4, уровень в белом списке – У3);

6) 1 статья в журнале Materials. Technologies. Design (журнал посвящен материаловедению и машиностроению, WoS – нет, квартиль Scopus – нет, уровень в белом списке – нет, категория ВАК РФ– К3)

Краткая характеристика основного содержания диссертации.

Диссертационная работа Черкасова А.А. 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 диссертационного исследования; формулируется цель и основные задачи работы; описывается предлагаемый автором подход к решению поставленных задач; характеризуется степень новизны полученных результатов и их апробация.

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. Показано, что для 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. В заключении главы сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена методике проведения и технике эксперимента. Представлена конструкция исследуемой разрядной системы в виде планарного магнетрона с дополнительным эмиттером электронов на основе вакуумного дугового разряда, расположенным с обратной стороны мишени магнетрона. Конструкция снабжена дополнительным отражательным электродом для более эффективного использования энергии инжектированных электронов. Для увеличения ресурса эмиттера была разработана и испытана инвертированная схема катодного узла вакуумного дугового разряда. Утверждается, что это позволило увеличить площадь рабочей поверхности катода вакуумной дуги, а также период обслуживания катодного узла 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 инжекции электронов из плазмы вакуумной дуги на параметры сильноточного импульсного магнетронного разряда. Показано, что инжекция электронов позволяеткратно снизить рабочее давление сильноточного магнетронного разряда вплоть до 0,025 Па.

Показано, что в области низкого рабочего давления предпочтительным является функционирование магнетронного разряда в режиме стабилизации тока разряда. Уменьшение рабочего давления приводит к возрастанию напряжения разряда и увеличению доли ионов металла в нем (т.е. переходу к режиму самораспыления). При этом увеличение тока инжекции электронов с дугового разряда позволяет реализовать магнетронный разряд в сильноточной форме (до 100 А) с достаточно низким падением напряжения (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 инъекции 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 инъекцией электронов для формирования покрытий и ионных пучков. Выявлено, что в режиме стабилизации тока магнетрона при снижении рабочего давления отмечается увеличение скорости распыления для всех исследованных материалов мишеней магнетрона: медь, хром, цирконий (режим самораспыления). Определено большинство параметров полученных покрытий и их зависимость от условий нанесения.

Показано, что разработанная магнетронная система при рабочем давлении ниже 0,05 Па, может быть использована в качестве генератора плазмы в источниках ионов как газа, так и металла. Представлены результаты применения разработанной магнетронной системы в качестве ионного источника для имплантации ионов газа и металла в широкий класс материалов. Исследовано изменение свойств поверхности образцов при имплантации в них широкого класса материалов.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

Замечания по работе. К содержанию работы могут быть сделаны следующие замечания:

1. Зависимости, изображенные на рисунке 2.12 а,б перепутаны местами.

2. В выводе по главе 2 указано, что переход к инвертированной схеме вакуумно-дугового эмиттера электронов с центральным иницирующим электродом позволяет увеличить ресурс катода вакуумной дуги и период его обслуживания как минимум в два раза. Однако, методики определения ресурса катода, экспериментальных доказательств данного утверждения, а также численного значения ресурса катода нет на протяжении всей работы.

3. Численные значения напряжений горения разряда от давления в вакуумной камере (рисунки 3.1, 3.6) определяются многими факторами, основным из которых является расстояние между катодом и анодом, а оно не указано.

4. Множитель для концентрации плазмы на рисунке 3.8 указан не корректно. Температура электронов, а также их концентрация в плазме очень сильно зависят от местоположения зонда, которое не указано (в тексте просто указано «на значительном удалении от мишени»).

5. Раздел 4.1.1 «Методика и техника эксперимента» логически должен быть размещен в главе 2.

6. Поверхностная проводимость, указанная в таблице 4.1 имеет не корректную размерность «Ом-м».

7. В тексте диссертации присутствует большое количество жаргонных выражений, не характерных для данной области знания, к примеру: «газовые нейтралы», «полному обрыву тока» (стр.70) «после погасания разряда» (стр. 70) и др.

Указанные замечания не снижают значимость полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования А.А. Черкасова.

Общее заключение. Основное содержание диссертации отражено в 11 научных работах, в том числе 8 научных статьях в рецензируемых журналах, включенных ВАК в перечень ведущих периодических изданий.

Результаты диссертационного исследования прошли апробацию на нескольких конференциях и научных семинарах. В диссертации представлены

