

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Национальный
исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)»**

Каширское шоссе, д.31, г. Москва, 115409
Тел. (499) 324-77-77, факс (499) 324-21-11
<http://www.mephi.ru>

№ _____
На № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор НИЯУ МИФИ,
д.ф.-м.н.
В.И. Шевченко
«26» июля 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Золотухина Дениса Борисовича
**«Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для
модификации материалов и электрореактивного движения»,**
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических
наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

Актуальность темы диссертации

Диссертация Золотухина Д.Б. посвящена исследованию физических процессов и механизмов, обеспечивающих генерацию плазмы в области форвакуумного диапазона давлений в условиях взаимодействия электронного пучка с диэлектрическими объектами. Основное внимание в работе направлено на изучение форвакуумных плазменных источников, обеспечивающих генерацию электронных пучков в области давлений от единиц до сотни Па. Главным достоинством таких источников является возможность электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов, обусловленная созданием в области транспортировки электронного пучка плотной плазмы, ионы которой обеспечивают нейтрализацию зарядки поверхности обрабатываемого изделия. Таким образом, расширяется область применения электронно-лучевых технологий, включая электронно-лучевой синтез покрытий.

В работе также исследуется вакуумно-дуговой разряд в миниатюрном плазменном двигателе и рассматриваются пути улучшения его характеристик, в том числе, с использованием технологии осаждения защитных покрытий с помощью форвакуумных источников электронов. Широкое применение таких плазменных двигателей ограничивается необходимостью удовлетворения трудносовместимых требований – обеспечения высоких показателей тяги, КПД и отношения тяги к мощности при сохранении низких значений массы, габаритов и энергопотребления устройства. Отдельной проблемой таких плазменных двигателей является деградация межэлектродного промежутка при длительном воздействии плазмы, что ограничивает время безаварийной работы устройства. Изучение физических процессов в миниатюрных импульсных вакуумно-дуговых двигателях с целью повышения их параметров и ресурса является важной задачей.

Таким образом, тематика исследований диссертационной работы является актуальной, а ее результаты имеют широкие перспективы практического использования.

Диссертационная работа Золотухина Д.Б. соответствует паспорту специальности ВАК 01.04.04 – Физическая электроника. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка опубликованных автором работ по теме диссертации.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в определении основных физических механизмов, обуславливающих процессы генерации пучковой плазмы форвакуумными плазменными источниками электронных пучков, а также в выявлении определяющего вклада в ионизационные процессы вторичной электронной эмиссии с поверхности диэлектрической мишени, облучаемой в форвакуумной области давлений электронным пучком. В процессе исследований измерены параметры пучковой плазмы и определены условия инициирования пучково-плазменного разряда (ППР) при распространении электронного пучка в свободном пространстве, а также при его инжекции в диэлектрическую полость. На основе исследований физических процессов взаимодействия электронного пучка с диэлектрической и

металлической мишенями в форвакуумной области давлений, при наличии ассистирующего потока ионов из пучковой плазмы, показана возможность электронно-лучевого синтеза многокомпонентных металлокерамических покрытий. Показано, что создание методом электронно-лучевого испарения защитного борсодержащего покрытия на межэлектродной поверхности разрядной системы миниатюрного вакуумно-дугового плазменного двигателя обеспечивает кратное увеличение его ресурса, а добавление второй ступени существенно повышает полную и удельную тягу этого устройства.

Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что в результате её выполнения достигнуто понимание основных физических процессов генерации в области повышенных давлений форвакуумного диапазона давлений пучковой плазмы, выявлены особенности взаимодействия в этих условиях электронного пучка с диэлектрической мишенью и изучены процессы функционирования миниатюрных дуговых плазменных двигателей. Результаты проведенных исследований являются научной основой технологий электронно-лучевой и ионно-плазменной модификации диэлектрических материалов, синтеза диэлектрических покрытий, а также методов и подходов повышения эксплуатационных параметров и эффективности электрореактивных плазменных двигателей.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов обусловлены использованием в экспериментах сочетания стандартных методов и подходов, гарантирующих получение надежных данных, и оригинальных методик, позволяющих получать новые, ранее неизвестные результаты. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждаются систематическим характером исследований, использованием независимых дублирующих экспериментальных методик, удовлетворительным совпадением экспериментальных данных с теоретическими оценками и результатами численного моделирования.

Результаты диссертационной работы Золотухина Д.Б. опубликованы в 35 статьях в высокорейтинговых международных физических журналах, входящих в первый и второй квартили библиографической базы Web of Science, и

доложены на ведущих международных научных конференциях.

Полученные в работе результаты могут быть использованы в научных и научно-производственных организациях, которые занимаются разработкой и применением электронных источников, и электронно-лучевой модификацией материалов, в том числе и синтезом функциональных и защитных покрытий.

Замечания по диссертации

1. Недостаточно обосновано применение модельного материала (меди) для исследования процессов влияния испарения материала мишени на параметры пучковой плазмы при работе с диэлектриками.
2. Не изложены соображения, на основе которых оценивалась площадь пучковой плазмы в балансовой модели, с помощью которой объясняется немонотонный характер зависимости температуры электронов от энергии пучка.
3. В отсутствие магнитного может наблюдаться существенная неоднородность параметров плазмы пучка, что требует более четкого обоснования использования результатов зондовых измерений локальных параметров плазмы для реализации метода определения заряда поверхности диэлектрика.
4. Применимость спектроскопической диагностики для характеристики энергии электронов в обсуждаемом диапазоне повышенных давлений (порядка десятков Па) требует дополнительного обоснования, поскольку не учитываются возможные процессы ступенчатой ионизации.
5. При определении коэффициента вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) не обсуждается вид функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) в рассматриваемом диапазоне давлений и не рассматривается ее зависимость от изменения давления и температуры мишени.
6. При повороте мишени и пространственном разделении вторичной плазмы и плазмы пучка, вслед за изменением ФРЭЭ, будет меняться коэффициент ВЭЭ. Использование полученных данных для интерпретации результатов без поворота мишени не вполне обосновано.
7. В разделе, посвященном исследованию характеристик плазменного двигателя на базе вакуумно-дугового разряда, не объясняется физическая природа эффекта

многократного увеличения максимального ресурса (в 5 раз) при небольшом повышении мощности (в 1,5–2 раза).

8. Оформление диссертации и автореферата не соответствует ГОСТ Р 7.0.11—2011, также в тексте имеются неточности и опечатки.

Сделанные замечания не затрагивают сущность выносимых на защиту научных положений, а также полученных в работе основных результатов, и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

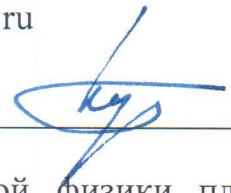
В целом, диссертация Золотухина Д.Б. является законченной научно-квалификационной работой, в которой в результате выполненных исследований решена важная научно-техническая проблема, заключающаяся в детальном изучении физических процессов генерации в области повышенных давлений форвакуумного диапазона пучковой плазмы, взаимодействия электронного пучка с диэлектрической мишенью и функционирования миниатюрных дуговых плазменных двигателей. Полученные результаты исследований важны как для развития фундаментальных аспектов физической электроники, в части плазменной электроники, так и для создания научных основ инновационных технологий электронно-лучевой и ионно-плазменной модификации диэлектрических изделий, синтеза диэлектрических покрытий, а также повышения эксплуатационных параметров и эффективности электрореактивных плазменных двигателей.

Диссертационная работа Золотухина Д.Б. соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.13 № 842. Высокий уровень научных исследований и превышение количества публикаций в ведущих международных физических журналах требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. в редакции от 20.03.2021) делают защиту диссертации в виде научного доклада обоснованной, а соискатель Золотухин Денис Борисович достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация и проект отзыва на диссертационную работу заслушаны, обсуждены и одобрены на научном семинаре кафедры физики плазмы Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», протокол № 8-21/22 от 20 июня 2022 г.

Отзыв составили:

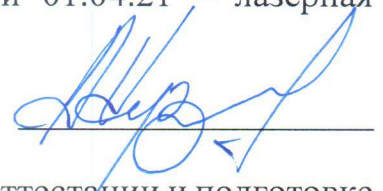
Казиев Андрей Викторович, научный сотрудник кафедры физики плазмы Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы, AVKaziev@mephi.ru



Гаспарян Юрий Микаэлович, и.о. заведующего кафедрой физики плазмы Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, к.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы, YMGasparyan@mephi.ru



Кузнецов Андрей Петрович, директор Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.21 – лазерная физика, профессор, APKuznetsov@mephi.ru



Кудряшов Николай Алексеевич, председатель совета по аттестации и подготовке научно-педагогических кадров НИЯУ МИФИ, д.ф.-м.н. по специальности 01.01.03 – математическая физика, профессор, NAKudryashov@mephi.ru



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ);

115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

Тел.: +7 (495) 788-56-99, доб. 9388

info@mephi.ru, <https://mephi.ru>