

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Золотухина Дениса Борисовича на тему

### « 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.** Исследования плазменных источников интенсивных электронных пучков, которые обеспечивают их генерацию и транспортировку в форвакуумном диапазоне давлений остаточного газа, в последние десятилетия получили мощное развитие, в основном, благодаря усилиям научного коллектива, где была выполнена данная работа. Эти исследования, с одной стороны, значительно расширили круг новых физических явлений, обнаруженных в относительно плотной низкотемпературной плазме пучкового разряда, а с другой – позволили разработать широкий спектр уникальных электронно-лучевых и плазменных технологий для воздействия на различные, в том числе, слабо проводящие материалы, с целью модификации их поверхностных и объемных свойств. Несмотря на значительный прогресс в данных исследованиях, многие важные аспекты этой новой обширной области физики плазмы остаются слабо изученными. Речь идет, в частности, об условиях генерации плазмы в области транспортировки электронного пучка в режиме электронно-лучевого испарения диэлектрической мишени и заметного влияния вторичной электронной эмиссии с облучаемой поверхности, о физических особенностях процесса инжекции электронного пучка в диэлектрическую полость и др.

Заметим, что предложенные и апробированные в данных исследованиях экспериментальные подходы и методы диагностики могут быть эффективно использованы для исследования физических процессов, протекающих в различных электроразрядных устройствах, в частности, в миниатюрных импульсных вакуумно-дуговых двигателях. Исследования, направленные на повышение эксплуатационных характеристик подобных устройств, приобрели в последнее время большую актуальность в связи с возрастающей потребностью в малых космических аппаратах, предназначенных для решения широкого спектра задач, связанных с развитием спутникового интернета, дистанционным зондированием Земли, и т.д.

В связи с вышеизложенным, актуальность решаемых в данной работе задач не вызывает сомнений.

Диссертационная работа состоит из вводной части трех больших разделов и заключения. Во **вводной** части автором обосновывается актуальность данной тематики, кратко рассматриваются основные достижения в этой области, формулируются основные цели и задачи работы, определена научная новизна

полученных в работе результатов, указана их научная и практическая значимость, а также сформулированы положения, выносимые на защиту,.

**Первый** раздел посвящен исследованию особенностей взаимодействия электронного пучка с различного вида мишенями в форвакуумной области давлений. Рассмотрен ряд новых физических явлений, возникающих в этих условиях, в частности, влияние паров испаряемого электронным пучком материала мишени, в том числе диэлектрической, на параметры предварительно созданной газовой пучковой плазмы; взаимосвязь параметров плазмы и параметров облучаемой пучком диэлектрической мишени; особенности процессов, возникающих при пучково-плазменном воздействии в процессе азотирования подложки и др.

Во **втором** разделе работы рассмотрены особенности процесса нанесения широкого спектра покрытий в многокомпонентной плазме, формируемой при электронно-лучевом испарении мишени в форвакуумном диапазоне давлений. Здесь автором приведены результаты детальных исследований взаимодействия электронного пучка с различного типа диэлектрическими и металлическими мишенями, масс-зарядового состава пучковой плазмы при электронно-лучевом нагреве мишени, а также механических, теплопроводных и магнитодиэлектрических характеристик синтезированных покрытий.

Результаты изучения параметров плазменного двигателя малых космических аппаратов на основе импульсного вакуумного дугового разряда с целью повышения его энергоэффективности и ресурса эксплуатации. изложены в **третьем** разделе диссертации.

В **заключении** кратко перечислены основные результаты диссертационной работы.

**Достоверность и обоснованность** научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием автором широкого набора современным методов экспериментального исследования, а также внутренней непротиворечивостью полученных результатов, которые хорошо согласуются с выводами работ, выполненных другими исследователями. Существенным обстоятельством также является удовлетворительное не только качественное, но и количественное согласие результатов эксперимента с приведенными модельными расчетами.

Отметим **научную новизну и практическую значимость** наиболее существенных результатов, полученных автором диссертации.

- Прежде всего, отметим исследованную автором зависимость от параметров электронного пучка основных параметров газометаллической плазмы (температуры и концентрации электронов), полученной путем распыления пучком различного типа мишеней.

Интересным представляется также изучение процессов генерации пучковой плазмы в диэлектрической полости, которое продемонстрировало существенные физические отличия от плазменного разряда в свободном пространстве.

- Показано, что электронно-лучевое испарение в форвакуумной области давлений твердотельных материалов с любой степенью электрической проводимости в атмосфере химически активных и инертных газов обеспечивает генерацию многокомпонентной пучковой плазмы, ионный состав которой можно варьировать в широком диапазоне величин. Это, в свою очередь, создает возможность синтеза комбинированных защитных и функциональных диэлектрических, электропроводящих и магнитных покрытий с определенным составом, структурой и свойствами.
- Физически изящным и весьма перспективным для приложений является предложенное автором «скрещивание» вакуумно-дугового разряда с магнитоплазменнодинамическим (МПД) ускорителем, позволившее почти на порядок повысить тяговые характеристики плазменного микродвигателя на основе такого разряда.
- Упрочняющее и защитное покрытие на основе борсодержащего слоя, полученное путем электронно-лучевого испарения бора в форвакуумной области давлений и нанесенное на межэлектродный изолятор первой ступени миниатюрного импульсного вакуумно-дугового плазменного двигателя, позволяет многократно увеличить время безаварийной работы устройства

Следует отметить широту научных интересов автора, отраженных в данной работе, где проведены исследования плазменных объектов с существенно различными параметрами, в т.ч. стационарного пучкового разряда в форвакуумном диапазоне давлений, процессов распыления мишеней разных типов и синтеза покрытий, импульсного вакуумно-дугового и МПД разрядов. При этом автором использовался обширный набор современных методов исследования: наряду с традиционной зондовой, использовалась также масс-зарядовая диагностика пучковой плазмы, тепловизионная диагностика мишеней, широкий спектр методов исследования механических, структурных, магнитных, электрических и оптических характеристик синтезированных покрытий. Тяговые характеристики электрореактивного двигателя исследовались с помощью уникального динамического торсионного тягового стенда. Отмечу также широкое использование автором модельных расчетов для поддержки экспериментальных результатов.

Результаты диссертационной работы являются серьезным продвижением в построении полной картины физических процессов, протекающих в пучковой плазме, генерируемой в форвакуумном диапазоне давлений, а также в улучшении эксплуатационных параметров миниатюрных электрореактивных двигателей для задач космонавтики. Поэтому наряду с фундаментальным характером полученных результатов, они имеют также важное прикладное значение, далеко выходящее за рамки решаемых в работе задач.

Д.Б. Золотухин является признанным специалистом в области физики низкотемпературной плазмы, его работы докладывались на многочисленных научных мероприятиях мирового уровня и широко известны в научном сообществе. О высоком уровне проведенных исследований свидетельствует также поддержка грантами Президента, грантами РФ и Минобрнауки, а также публикация результатов диссертационной работы в 35 статьях в журналах первого и второго квартилей по базе данных научного цитирования Web of Science. Отметим широкие международные научные контакты автора, в частности, плодотворные исследования, выполненные совместно со специалистами университета Джорджа Вашингтона (г. Вашингтон, США) и Техниона (г. Хайфа, Израиль).

Как всякое серьезное научное исследование, диссертационная работа не свободна от **недостатков**.

**Общее** замечание. Вследствие малого объема работы многие вопросы рассмотрены очень кратко, не обсуждаются полученные результаты, не сформулированы выводы по отдельным вопросам. Это существенно затрудняет оценку физического уровня проведенных исследований.

**Конкретные** замечания.

1. На с.13 и 14 приведена экспериментальная зависимость температуры электронов от энергии электронного пучка и результат соответствующего модельного расчета в плазменно-пучковом разряде с распыляемой медной мишенью. Необходимо пояснить, почему зависимость носит пороговый характер, и чем определяется пороговая величина энергии пучка 6 кэВ, превышение которой приводит к резкому уменьшению температуры. Следует также пояснить связь результатов на рис.2 и 3. Утверждение автора на с.14 «...рост электронной температуры с повышением доли атомов меди связано с увеличением энерговклада пучка в образование плазмы...» противоречит рис.3 и требует пояснений.

2. Фотография на рис.5 (с.15), где изображено взаимодействие пучка с мишенью, ориентированной под углом к пучку, вызывает ряд вопросов. Во-первых, следует пояснить, почему плазменный столб, образованный вторичными электронами, ориентирован по нормали к мишени, хотя известно, что максимум их распределения лежит под углом, равным углу падения на мишень, Во-вторых,

непонятен механизм, обеспечивающий формирование коллимированного столба вторичной плазмы.

3. На с. 21 приведен результат, показывающий, что использование электронного пучка в форвакуумном диапазоне давлений позволяет резко увеличить долю атомарных ионов в азотной плазме, а значит, эффективность процесса азотирования подложки. Результат имеет большой прикладной потенциал, однако автор ограничился лишь краткой информацией о данном эффекте. Следовало, во-первых, пояснить ход экспериментальных кривых, во-вторых, показать, насколько эффективнее азотирование возросло в данном процессе по сравнению с известными методами.

4. На рис. 13 (с.23) следует пояснить, что означают цифры 1,2,3, а также ход экспериментальных зависимостей.

5. На с.23, 24 сообщается о зажигании плазменно-пучкового разряда при инъекции электронного пучка в диэлектрическую полость, заполненную газом при форвакуумном давлении. Этот очень интересный эффект никак не комментируется. В частности, нет анализа физических условий возбуждения ППР при токе пучка больше 25 мА (рис.14), отсутствует оценка длины коллективной релаксации пучка и ее зависимости от параметров плазмы и пучка.

6. На с. 26 не комментируется, почему плотность ионного тока на мишень и потенциал на поверхности мишени для случая пучковой плазмы в полости значительно выше, чем для плазмы без полости.

7. На с.31 приведено сравнение электронно-лучевого и «классического» магнетронного метода распыления мишени и утверждается, что «...возможность получения в плазме концентрации ионов материала мишени (вне зависимости от ее рода или проводимости), кратно превышающей концентрацию ионов остаточной газовой атмосферы и рабочего газа, а также высокие скорости испарения тугоплавких керамических мишеней (десятки миллиграмм в минуту) являются существенными преимуществами» первого метода. Вместе с тем известно, что метод сильноточного импульсного магнетронного разряда (HIPIMS технология) также позволяет получить подобный результат. Автору следовало проанализировать данную ситуацию.

8. Следовало, хотя бы кратко, сравнить описанный на с.35-37 метод пучково-плазменного синтеза углеродных наноструктур с хорошо развитыми в настоящее время другими методами с целью выявления преимуществ первого. Отмеченные замечания носят, в основном, характер рекомендаций и не снижают, в целом, высокой оценки диссертационной работы.

#### **Соответствие содержания диссертации указанной специальности**

В диссертационной работе представлены результаты исследований низкотемпературной плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакуумном

диапазоне давлений рабочих газов, а также свойств покрытий, синтезированных в результате распыления этим пучком различных мишеней. Представлены также результаты исследований параметров миниатюрных плазменных двигателей.

В соответствии с паспортом специальности такие работы относятся к специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

### **Заключение**

Диссертационная работа Д.Б. Золотухина выполнена на высоком научном уровне, является завершенным исследованием, результаты работы представляют существенный вклад в развитие фундаментальных представлений и прикладных аспектов физики низкотемпературной плазмы. Научная ценность, практическая значимость, новизна и достоверность представленных в диссертации результатов несомненны. Совокупность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных автором диссертации, является вполне обоснованной.

Таким образом, диссертационная работа «Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения», отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, изложенным в п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ, а ее автор Золотухин Д.Б. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Заведующий кафедрой общей и космической физики ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет», доктор физико-математических наук, профессор Паперный Виктор Львович.

664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 1

Телефон: 8- (3952)-521-254; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru

11.07.2022 года, г.Иркутск

 Паперный В.Л.

