

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Золотухина Дениса Борисовича **«Параметры и характеристики пучковой плазмы, генерируемой в форвакуумной области давлений электронным источником с плазменным катодом»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - физическая электроника

### **Актуальность темы**

Источники электронных пучков на основе плазменных разрядов находят широкое применение для различных приложений: электронно-лучевая сварка, обработка поверхности изделий, плазмохимические реакторы и др. Используемые до последнего времени высоковакуумные источники имеют ряд существенных недостатков, связанных, в частности, с проблемами снятия заряда с поверхности обрабатываемой диэлектрической подложки и компенсации объемного заряда пучка ограничивающего ток. Выполняемые в течение ряда лет исследования на кафедре физики ТУСУР показали, что эти проблемы можно решить путем использования плазменных источников электронов в форвакуумном диапазоне давлений. Несмотря на впечатляющие результаты, полученные ранее в этих работах, ряд важных аспектов данной научно-технической проблемы остается неисследованным. В частности, слабо изучены параметры плазмы, генерируемой электронными пучками в форвакуумном диапазоне давлений в отсутствие удерживающего пучок продольного магнитного поля. Кроме того, остаются неисследованными физические процессы, протекающие при инжекции пучка в диэлектрическую полость, что представляет интерес для различных приложений. Изучению этих вопросов, а также созданию адекватного методического обеспечения исследований, посвящена данная работа, актуальность которой не вызывает сомнений.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 151 страницу, включая 88 рисунков и 5 таблиц. Список литературы включает 156 источников.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна и практическая ценность работы.

**Первая глава** носит обзорный характер и содержит анализ литературных источников, посвященных экспериментальным исследованиям и численному моделированию особенностей генерации плазмы ускоренным электронным пучком в широком диапазоне давлений ( $10^{-1} - 10^{-4}$  Па). Отмечено, что в

настоящее время отсутствуют исследования процессов, протекающих при инжекции электронного пучка в диэлектрическую полость в форвакуумном диапазоне. Показано, что методы диагностики, обычно используемые в экспериментальных исследованиях низкотемпературной плазмы применимы при изучении газо-металлической плазмы в форвакуумном диапазоне давлений. На основе проведенного анализа сформулированы основные задачи исследования.

Описание экспериментальной установки и набора используемых методик (линейка ленгмюровских зондов, времяпролетный и квадрупольный масс-спектрометры, спектроскопические методы) приведено в **главе 2**.

**Третья глава** посвящена описанию результатов экспериментальных исследований и модельных расчетов процессов генерации плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакуумном диапазоне давлений. Рассмотрены случаи свободного распространения пучка в рабочем объеме, а также процессы, возникающие при инжекции электронного пучка в металлическую или диэлектрическую полость.

Прикладные аспекты описанных исследований изложены в **Главе 4**. В частности, описаны эксперименты по генерации газо-металлической плазмы при электронно-лучевом испарении металлической мишени и осаждению покрытий из полученной плазмы. Приведены характеристики покрытий, показана эффективность данной методики для создания плотных бездефектных пленок. Показана также возможность разработки технологического процесса стерилизации диэлектрических (стекло, пластик) сосудов на основе исследованного плазменно-пучкового разряда.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы, обосновывается достоверность полученных результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

### **Оценка новизны и достоверности**

Основными новыми научными результатами можно назвать следующие:

В **области физики** плазменно-пучкового разряда автором показано, что

1. В атмосфере различных газов форвакуумной области давлений возможна транспортировка электронного пучка с энергией несколько килоэлектронвольт в отсутствие ведущего магнитного поля с сохранением энергии и сечения пучка. Измерены параметры плазмы образующейся в процессе транспортировки пучка.
2. Экспериментально установлены параметры плазмы, образующейся при инжекции электронного пучка в диэлектрическую полость, в широком форвакуумном диапазоне давлений газа и энергии пучка. Показано, что путем оптимизации этих параметров удастся создать в полости однородный (с точностью до 10%) плазменный столб. Также показано, что концентрация

и температура пучковой плазмы в диэлектрической полости выше, чем в свободном пространстве. С помощью модельных расчетов установлено, что этот эффект связан с внесением в плазму дополнительной энергии за счет ускорения вторичных электронов в пристеночном слое объемного заряда.

**В области диагностики** плазмы пучкового разряда в форвакуумном диапазоне давлений автором

1. Модернизирован прибор для измерения массового состава плазмы (обращенный времяпролетный масс-спектрометр), что привело к значительному возрастанию разрешающей способности и чувствительности прибора
2. Выполнена модернизация серийно выпускаемого квадрупольного газового анализатора остаточной атмосферы, что позволило создать устройство, способное с разрешением до 1 а. е. м. исследовать ионный состав как газовой, так и газо-металлической плазмы, генерируемой в исследуемой области давлений.

**Практическая ценность работы** заключается в том, что автором показано следующее:

1. Газо-металлическая пучковая плазма, получаемая с помощью исследованного плазменного источника электронов, может быть использована для осаждения покрытий из оксидов металлов, обеспечивая высокую скорость процесса при относительно небольшом энергопотреблении.
2. Инжекция электронного пучка формируемого в диэлектрический сосуд с образованием внутри него плазмы в форвакуумной области давлений может быть использована для эффективной плазменной стерилизации внутренней поверхности сосуда.

#### **Обоснованность научных положений и выводов,**

выдвинутых соискателем, основывается на использовании широкого спектра современных методик (зондовых, оптических, масс-спектроскопических), сопоставлении с известными литературными данными, а также сравнении с модельными расчетами. Последнее обстоятельство является важным достоинством работы. Так, в разделе 3.4.2. автором предложена простая модель плазмы, находящейся внутри диэлектрической полости в условиях форвакуумного диапазона давлений, которая показала хорошее согласие с экспериментальными результатами. Таким образом, являются несомненными и актуальность тематики, и научная значимость, и новизна работы, и достоверность полученных результатов.

#### **Рекомендации по внедрению результатов работы**

Полученные в работе результаты могут быть использованы в научных исследованиях процессов генерации пучков заряженных частиц в форвакуумном диапазоне давлений, а также при разработке технологических

устройств для синтеза композитных покрытий и плазменной стерилизации. Результаты, представленные в диссертации, могут быть использованы в ряде ведущих отечественных научных и технологических центров, в частности, в Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН (г. Томск), в Институте электрофизики Уральского отделения РАН (г. Екатеринбург), Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ (г. Москва), ФГБОУ ВО «Томский университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск).

**Автореферат полностью соответствует структуре и отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.**

**Подтверждение** опубликованных основных результатов диссертации в научной печати

По результатам исследований автором опубликовано 34 работы, среди которых 9 статей в журналах из перечня ВАК, реферируемых в базах данных Web of Science и Scopus, и 19 полных текстов докладов на международных и всероссийских конференциях, получено 4 патента РФ на полезные модели и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Это свидетельствует о разносторонних интересах автора и в области экспериментальных исследований, и прикладных разработок, и модельных расчетов. Особенно следует отметить высокий научный уровень результатов работы, опубликованных в рейтинговых международных журналах: Plasma Sources Sci. Technol., Phys. Plasmas, Rev. Sci. Instrum.

В диссертации имеются **недостатки**.

1. Представленный в работе результат модельных расчетов (Рис.3.1) показал, что потери энергии пучка при транспортировке в газе очень малы. Этот результат выглядит достаточно неожиданным, поскольку в соответствии с результатами расчетов в разделе 3.4 потери оказываются достаточными для создания относительно плотной (порядка  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) горячей (около 3 эВ) плазмы. Необходимо сопоставить эти результаты.

2. На рис. 2.8 сравниваются масс-спектры ионов пучковой плазмы, полученные до и после выполненной автором модернизации времяпролетного спектрометра. Однако эти спектры получены в различных экспериментальных условиях (гелий и аргон в качестве рабочих газов), так что затруднительно сделать заключение о большей эффективности прибора во втором случае. Кроме того, сигнал в этом случае более чем на три порядка превышает сигнал в первом случае, что вызывает вопросы об идентичности схемы измерений. На рис.3.10 приведены результаты измерений с помощью модернизированного времяпролетного спектрометра, однако амплитуды выходного сигнала соответствуют указанным для исходного прибора. Необходимо пояснить данный результат. Следовало также пояснить, зачем автор использовал и

электронный конвертор, хотя известно, что МКП легко регистрирует непосредственно ионы.

3. Автор предлагает использовать плазменно-пучковый разряд для синтеза композитных (оксидных, нитридных) пленок на поверхности подложки. Однако известно, что уже давно разработаны эффективные технологии таких процессов на основе вакуумно-дуговых и магнетронных разрядов разных типов. В работе было необходимо сравнить и обосновать конкурентные преимущества предлагаемой технологии по сравнению с известными.

### Заключение

Указанные замечания, в основном, имеют характер рекомендаций и не снижают в целом высокой итоговой оценки диссертационной работы Золотухина Д. Б., которая подтверждает достаточную научную квалификацию ее автора.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне, поставленные цели соответствуют полученным результатам, ее содержание соответствует специальности 01.04.04 – Физическая электроника. Отметим также, что работа написана грамотно, легко читается, хорошо оформлена.

Таким образом, диссертация Золотухина Д. Б. является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработаны методы диагностики и исследованы особенности генерации плазмы, создаваемой в форвакуумном диапазоне давлений источником электронного пучка с плазменным катодом в условиях свободного распространения пучка и при его инжекции в диэлектрическую полость, а также при электронно-лучевом испарении металлической мишени. Эти вопросы имеют важное значение для развития физики и техники генерации плазмы и электронных пучков, технологий плазмохимического синтеза покрытий и стерилизации изделий и инструментов. Диссертация соответствует требованиям ВАК и требованиям «Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 "О порядке присуждения ученых степеней" с изменениями от 21 апреля 2016 г. № 335», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Золотухин Денис Борисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

Отзыв составил Паперный Виктор Львович,

адрес: 664003, Иркутск, К.Маркса,1; тел.+7(914)9333884; e-mail: paperny@math.isu.runnet.ru; место работы ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; зав. кафедрой общей и космической физики; д.ф.-м.н., профессор.

В.Л. Паперный

