

ОТЗЫВ

официального оппонента профессора, доктора физико-математических наук Кривобокова В.П. о диссертационной работе Золотухина Дениса Борисовича **«Параметры и характеристики пучковой плазмы, генерируемой в форвакуумной области давлений электронным источником с плазменным катодом»**, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Гомский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 151 странице, содержит 88 рисунков, 5 таблиц и список литературы, включающий 156 источников.

Актуальность работы

Исследования, проведенные автором, несомненно, актуальны, и это подтверждается следующими соображениями. Во-первых, имеется необходимость комплексного исследования пучковой плазмы, генерируемой источником электронов с плазменным катодом при давлениях 1-15 Па. Во-вторых, слабо исследована газо-металлическая плазма, генерируемая при электронно-лучевом испарении мишени с одновременной ионизацией испаренного материала и газа, в котором распространяется пучок.

Техника генерирования пучковой плазмы для обработки различных материалов стала более доступной благодаря появлению форвакуумных плазменных источников электронов, способных функционировать при давлении 1-100 Па. Это обстоятельство дает возможность исследовать плазму, генерируемую при инъекции электронного пучка в диэлектрическую полость, не содержащую внутри электродов.

Цель диссертационной работы Золотухина Д. Б. – проведение экспериментальных исследований, численного моделирования процессов генерации и демонстрация технологических возможности пучковой плазмы, создаваемой форвакуумным источником электронов с плазменным катодом, в отсутствие удерживающего пучок магнитного поля, в условиях свободного распространения пучка, при его инжекции в диэлектрическую полость, а также при электронно-лучевом испарении металлической мишени.

Анализ содержания диссертации

Во *Введении* обоснована актуальность темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, приведены защищаемые положения, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы. Основные результаты диссертации перечислены ниже.

В *Главе 1* дан обзор литературы по теме рассматриваемой работы. Отмечается отсутствие экспериментальных работ и численных моделей, посвященных генерации пучковой плазмы при инжекции электронного пучка в диэлектрическую полость в форвакууме. Сделан вывод о необходимости исследования особенностей генерации газо-металлической плазмы при электронно-лучевом испарении металлов в форвакууме. На основе данного обзора автором сформулированы основные задачи исследования.

В *Главе 2* описывается экспериментальная установка и методики, использованные для генерации и диагностики пучковой плазмы в форвакуумном диапазоне давлений. Приведена схема установки.

Глава 3 посвящена результатам экспериментальных исследований и численного моделирования процессов генерации плазмы, создаваемой электронным пучком в форвакуумной области давлений при свободном распространении электронного пучка в вакуумной камере, а также в случае инжекции электронного пучка в металлическую или диэлектрическую полости.

В *Главе 4* приведены возможные применения пучковой плазмы, генерируемой ускоренным электронным пучком в форвакуумной области давлений. Продемонстрированы эксперименты по генерации газо-металлической плазмы при электронно-лучевом испарении металлической мишени и осаждению покрытий из полученной газо-металлической плазмы. Показана возможность применения пучковой плазмы для стерилизационной обработки внутренних поверхностей сосудов.

Заключение представляет собой краткое изложение основных результатов работы.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Защищаемые положения и выводы вытекают из полученного в работе экспериментального материала. Они хорошо сформулированы и адекватно отражают содержание диссертации. Результаты, изложенные в ней, носят непротиворечивый характер, взаимно дополняют друг друга и в целом соответствуют существующим представлениям о свойствах пучковой плазмы. Полученные результаты в целом согласуются с данными, приведёнными в работах других авторов.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации, выводы и положения, выносимые на защиту.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением современных методов исследований и подтверждена большим количеством экспериментальных данных, корректностью постановки задачи, подробным анализом результатов и тщательной формулировкой выводов. Кроме того, она подтверждена апробацией полученных материалов на ряде научных семинаров, а

также в процессе выступлений автора на российских и международных конференциях.

Результаты, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в виде 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК, 19 научных докладов на конференциях, четырёх патентов РФ и двух свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Научная новизна

В данной работе автором впервые получен ряд новых, оригинальных результатов. Наиболее ценные из них перечислены ниже.

1. Исследованы процессы генерации пучковой плазмы внутри диэлектрической полости. Обнаружено, что в таких условиях концентрация и температура электронов выше, чем в плазме, создаваемой при свободном распространении пучка, чему предложено объяснение на основе численной модели.

2. Показано, что модернизация обращенного времяпролетного масс-спектрометра и оптимизация его параметров позволяют использовать этот прибор для диагностики масс-зарядового состава ионов пучковой плазмы в форвакуумной области давлений.

3. Изучены малоизвестные особенности генерации газо-металлической плазмы, создаваемой при электронно-лучевом испарении металлов (Zn, Mg, Al) в атмосфере кислорода в форвакуумной области давлений.

Практическая значимость диссертации состоит в следующем.

1. Определены условия генерации однородной плазмы при инъекции пучка ускоренных электронов в диэлектрическую полость и показана возможность её использования для стерилизации внутренней поверхности сосудов.

2. Продемонстрирована генерация газо-металлической плазмы при электронно-лучевом испарении металлов с одновременной ионизацией паров и

газовой атмосферы, а также применение газо-металлической плазмы для осаждения покрытий.

3. Результаты работы могут использоваться и в других устройствах с аналогичными разрядными системами, включая ионно-плазменные напылительные установки, генераторы низкотемпературной плазмы и ряд других систем, функционирующих в области повышенных давлений.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.04 – физическая электроника (п. 3. Вакуумная электроника, включая методы генерирования потоков заряженных частиц, электронные и ионные оптические системы, релятивистскую электронику; п. 5. Плазменная электроника, включая физические процессы в плазменных электронных приборах: СВЧ-генераторах, усилителях, плазменных (коллективных) ускорителях, плазменно-пучковых разрядах; п. 6. Изучение физических основ плазменных и лучевых (пучковых) технологий, в том числе модификации свойств поверхности, нанесение тонких пленок и пленочных структур).

Необходимо отметить качественное совпадение результатов расчетов с экспериментальными данными, аргументированность и обоснованность научных положений и выводов, а также теоретическую и практическую значимость проведенного исследования.

Работа Золотухина Д. Б. раскрывает новые стороны пучковой плазмы. Результаты, полученные при подготовке диссертации, несомненно, будут полезны для разработчиков новых газоразрядных систем и технологий на их основе. Диссертация представляет собой целостный и обстоятельный труд, в котором содержится решение актуальных проблем физики образования пучковой плазмы в

ограниченном пространстве, технологическая составляющая которых имеет хорошую перспективу практического применения.

К достоинствам диссертации следует отнести ясное, четкое, последовательное изложение материала.

Мы не обнаружили в работе серьезных смысловых ошибок и противоречий. Но есть несколько **замечаний** по поводу её содержания.

1. Очень хорошо, что автор сделал попытку построить модель пучковой плазмы для описания особенностей её поведения в диэлектрической полости и свободном пространстве. Но здесь в основу положено линейное уравнение баланса (сечения ионизации не зависят от энергии электронов и т.д.). Оно пригодно только для оценочных расчётов. В диссертации отсутствует оценка корректности предложенной модели.
2. Не понятна логика исследования изотопного состава ионов металлов в газо-металлической плазме. На что он влияет?
3. Автор осаждает покрытия из химически активных металлов (алюминий, магний и т.д.) в присутствии пучковой плазмы, содержащей ионы кислорода. Это заставляет нас предположить, что должны образовываться оксиды (Al_2O_3 и т. д.) и металлическая плёнка должна быть ими загрязнена. В работе нет данных об аттестации этих плёнок. Без этих исследований трудно судить о технологических перспективах пучковой плазмы для осаждения покрытий.

Высказанные замечания не снижают общего положительного впечатления от работы, которая выполнена на должном уровне.

Диссертация Золотухина Дениса Борисовича является завершённым научным трудом, включающим большой объём исследований и глубокую критическую оценку полученных результатов.

Заключение

Проведённый анализ позволяет утверждать, что диссертационная работа Золотухина Д.Б. является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для физической электроники. Кроме того, получены новые данные, которые являются физической основой для создания источников пучковой плазмы и технологий обработки материалов и изделий на её основе. Считаю, что по содержанию, объёму проведенных исследований, качеству полученных результатов, научной новизне и практической значимости представленная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Золотухин Денис Борисович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – физическая электроника.

Официальный оппонент, заведующий кафедрой экспериментальной физики
Национального исследовательского Томского политехнического университета,
доктор физико-математических наук, профессор

В. П. Кривобоков
16.11.2016

В.П. Кривобоков

Кривобоков Валерий Павлович, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30

Телефон: (3822) 606-418, факс 417-956, E-mail: krivobokov@tpu.ru

«Подпись Кривобокова В. П. подтверждаю»

Ученый секретарь Национального исследовательского
Томского политехнического университета



О. А. Ананьева

О. А. Ананьева