

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Золотухина Дениса Борисовича  
«Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации  
материалов и электрореактивного движения»,  
представленной на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
01.04.04 – «Физическая электроника»

Диссертационная работа Золотухина Дениса Борисовича «Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения» посвящена экспериментальному исследованию основных физических процессов и механизмов, обеспечивающих генерацию пучковой и газоразрядной плазмы в области повышенных давлений форвакуумного диапазона при взаимодействии электронного пучка с диэлектрической мишенью, а также созданию научных основ технологий электронно-лучевой и ионно-плазменной модификации диэлектрических изделий, синтеза диэлектрических покрытий и исследованию физических процессов в маломощных миниатюрных импульсных вакуумно-дуговых плазменных двигателях.

Вводная часть диссертации посвящена актуальности темы исследования. В ней описана практическая важность активно развиваемых в последние годы форвакуумных плазменных источников электронов, с помощью которых создаются рабочие установки с возможностью непосредственной электронно-лучевой обработки диэлектрических материалов. Также в ней указывается, что несмотря на заметный прогресс в повышении выходных параметров форвакуумных плазменных источников электронов, а также успешную демонстрацию возможности эффективного применения источников такого типа для электронно-лучевой модификации диэлектрических материалов, физические аспекты генерации плазмы в области транспортировки электронного пучка, в том числе в условиях электронно-лучевого испарения диэлектрической мишени и заметного влияния вторичной электронной эмиссии с обрабатываемой поверхности, а также физические особенности инъекции электронного пучка в диэлектрическую полость и ряд других процессов изучены недостаточно и требуют проведения детальных и комплексных экспериментальных исследований, теоретических оценок и численного моделирования. Другим аспектом, в котором прослеживается важность представленной работы, является возрастающая в настоящее время потребность в малых космических аппаратах, так называемых «кубсатах», обусловленная привлекательностью создания на их основе «созвездий» спутников для распределенного хранения баз данных вне Земли, спутникового интернета, дистанционного зондирования Земли, а также обучения студентов и популяризации космонавтики.

В основной части диссертации представлено три главы. Первая глава посвящена экспериментальному исследованию физических эффектов, сопровождающих генерацию многокомпонентной пучковой плазмы при электронно-лучевом облучении диэлектрической мишени, а также при инъекции электронного пучка в

диэлектрическую полость. Показано, что зависимость параметров пучковой плазмы и ее ионного состава от интенсивности испарения мишени может иметь значение при разработке плазмохимических пучково-плазменных реакторов. Предложены и реализованы методы измерения установившегося значения потенциала поверхности диэлектрика при его электронно-лучевом облучении. Показано, что при неизменных параметрах электронного пучка, а также давления и рода газа, величина установившегося потенциала определяется коэффициентом вторичной электронной эмиссии с поверхности диэлектрика, которая, в свою очередь, оказывает влияние на параметры прилегающей к диэлектрической мишени пучковой плазмы.

Во второй главе экспериментально исследуется пучково-плазменный синтез покрытий при электронно-лучевом испарении диэлектрической мишени в форвакуумной области давлений. Предложен и охарактеризован метод синтеза покрытий, обеспечивающих как защитные, так и функциональные свойства. Для синтеза углеродных наноструктур изучены особенности импульсного дугового анодного разряда в гелии повышенного давления.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию особенности функционирования импульсного вакуумного дугового разряда в плазменных двигателях малых космических аппаратов. Показано, что при наличии аксиально-симметричного постоянного магнитного поля  $\sim 200$  мТл вакуумно-дуговой разряд в двухступенчатом вакуумно-дуговом МПД-двигателе демонстрирует пороговое поведение. Использование обнаруженного эффекта позволяет повысить тягу, КПД и удельную тягу. С учетом малости потребляемой мощности и небольшой массы двигателя были получены такие значения этих характеристик, которые являются рекордными для систем электрореактивного движения малых космических аппаратов, причем отмечается, что достигнутые параметры не являются физическим пределом.

Научная новизна и значимость результатов данной работы не вызывает сомнения. Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в 35 печатных работах, 20 из которых – в виде статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ и в первый квартиль Q1 базы данных отслеживания цитируемости Web of Science, 15 – в виде статей в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ и во второй квартиль Q2 базы данных отслеживания цитируемости Web of Science. Основные положения диссертации соответствуют специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Автореферат оставляет хорошее впечатление, написан достаточно подробно, имеется необходимая четкость. Серьезных замечаний по автореферату нет. Однако присутствуют некоторые неточности редакторского характера, не умаляющие ценность работы. Например, на рисунке 12 (б) отмечены точки с измеренной температурой электронов, и рядом с точками проведена некоторая кривая, описание которой отсутствует.



Диссертация Золотухина Дениса Борисовича «Генерация и исследование пучковой и газоразрядной плазмы для модификации материалов и электрореактивного движения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную лично автором. Диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК и заявленной специальности, а Золотухин Д.Б. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника».

Отзыв составил

Гавриков Андрей Владимирович,

Доктор физико-математических наук, доцент,

Заместитель директора ОИВТ РАН по научной работе

Адрес: 125412 Москва, Ижорская ул. д. 13, стр.2

Тел.: +7 (495) 484-18-44

E-mail: gavrikov@ihed.ras.ru



/ Гавриков А. В. /

Подпись А. В. Гаврикова заверяю:

Директор ОИВТ РАН,

/ Петров О.Ф./

Федеральное государственное бюджетное учреждения науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, (495) 485-82-44, webadmin@ihed.ras.ru