На правах рукописи

Юшков Юрий Георгиевич

ФОРВАКУУМНЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ЭЛЕКТРОНОВ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

01.04.20 – Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

ТОМСК – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Окс Ефим Михайлович

Официальные оппоненты: **Коваль Николай Николаевич,**
доктор технических наук,
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, заместитель директора по научной работе

Троян Павел Ефимович
доктор технических наук, профессор,
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, заведующий кафедрой Физической электроники

Ведущая организация: **Институт электрофизики Уральского отделения РАН**
(г. Екатеринбург)

Защита состоится “25” декабря 2012 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2 а.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан “____” ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент А.В. Кожевников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Плазменные источники электронов – ускорители электронов прямого действия с плазменным катодом, используются в радиационных технологиях, для термической обработки и сварки различных материалов, а также в процессах нанесения покрытий. Они некритичны к «тяжелым» вакуумным условиям и способны обеспечить генерацию электронных пучков при повышенных давлениях, в том числе и форвакуумного диапазона. Расширение рабочих давлений электронных источников в форвакуумную область (1 - 20 Па) связано не только с упрощением вакуумной системы (требуется лишь механическая ступень откачки), но и с новыми возможностями электронно-лучевых технологий. К таким возможностям относится обработка электронным пучком поверхности материалов с большим электрическим сопротивлением, например керамик.

Обработка диэлектрика электронным пучком в вакууме приводит к зарядке его поверхности вплоть до потенциала, отражающего электроны пучка. Но при форвакуумных давлениях отрицательный потенциал поверхности нейтрализуется потоком ионов из вторичной плазмы пучка, позволяя проводить обработку диэлектрика, в частности керамики, электронным пучком[1,2]. Однако, измерений самого потенциала поверхности керамики, заряжаемой пучком в таких условиях, проведено не было. Изучение поведения этого потенциала в зависимости от параметров пучка и давления газа позволит определить и оптимизировать параметры импульсного форвакуумного электронного источника для обработки керамики. Кроме того, важно экспериментально показать, что обработка керамики «форвакуумным» электронным пучком позволяет целенаправленно изменять свойства ее поверхности и, тем самым, обосновать перспективность использования таких источников для этого процесса.

Неоднородность распределения плотности тока по сечению электронного пучка приводит к неравномерной обработке поверхности мишени. Достижение однородного распределения плотности тока пучка в форвакуумных плазменных источниках электронов представляется необходимым условием их применения для обработки поверхности любых материалов, но имеет принципиальное значение при обработке керамики, поскольку, как и любой другой диэлектрик, обладающий низкой теплопроводностью, керамика разрушается от термических напряжений при неравномерном нагреве. Важным представляется также уменьшение потерь пучка на электродах ускоряющей системы источника, которые, в таких источниках, составляют более 30 % от тока пучка.

Таким образом, тематика работы, направленная на разработку форвакуумного плазменного источника импульсного широкоапертурного пучка электро-

---

[1] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс, «О возможности электронно-лучевой обработки диэлектриков плазменным источником электронов в форвакуумной области давлений» // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т. 35, № 11. – С. 61–66.

[2] А.В. Медовник, В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, Е.М. Окс «Электронно-лучевая обработка керамики» // Физика и химия обработки материалов. - 2010. № 3. - С. 39-44.

нов с высокой однородностью плотности тока по его сечению, обеспечивающего параметры, достаточные для эффективной обработки поверхности диэлектрических, в том числе и керамических материалов, представляется актуальной.

Цель работы состояла в проведении экспериментальных исследований, направленных на изучение особенностей формирования в форвакуумной области давлений импульсных электронных пучков при эмиссии электронов с развитой поверхности плазмы, и создание на этой основе источника электронов для обработки поверхности диэлектрических материалов, главным образом различных керамик. В задачу работы также входило проведение на примере керамики исследований процессов зарядки поверхности диэлектрика под воздействием ускоренного импульсного электронного пучка и демонстрация принципиальной возможности эффективной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических материалов.

Научная новизна работы заключается в том, что для импульсного плазменного источника электронов, функционирующего в форвакуумной области давлений:

1. Выявлены причины, приводящие к неоднородности распределения плотности тока пучка по его сечению, и предложены пути их устранения.

2. Проведены измерения величины отрицательного электрического потенциала, создаваемого пучком на поверхности диэлектрической мишени, и определена степень влияния на него параметров пучка и давления газа.

3. Изучено влияние параметров электронного пучка на изменение поверхностных характеристик одного из наиболее используемых диэлектриков - алюмооксидной керамики.

Научная и практическая ценность результатов работы заключается в том, что:

1. Научные положения и выводы, сделанные на основании проведенных исследований, вносят вклад в понимание особенностей процесса генерации импульсных «форвакуумных» электронных пучков.

2. На основе проведенных исследований в широкоапертурном импульсном плазменном источнике электронов, функционирующем в форвакуумной области давлений, достигнуты параметры электронного пучка, обеспечивающие возможность эффективной модификации поверхностных свойств непроводящих керамических изделий.

3. Полученные в работе результаты могут быть использованы в других устройствах, имеющих подобные разрядные структуры и функционирующих в форвакуумном диапазоне давлений: а именно, генераторах низкотемпературной плазмы и источниках ионов.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается систематическим характером исследований, использованием различных экспериментальных методик, сопоставлением экспериментальных результатов и численных оценок, а также практической реализацией научных положений и выводов при создании источников электронов.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка импульсного плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующего в форвакуумном диапазоне давлений (1 – 20 Па), обусловлена радиальной неравномерностью распределения концентрации эмиссионной плазмы и неоднородностью тока пучка в области его формирования, возникающей из-за нарушения плоскопараллельной конфигурации эмиссионного и ускоряющего сеточных электродов. Размещение на оси полого катода цилиндрической вставки оптимизированной длины и использование принудительного натяжения сеточных электродов системы ускорения приводит к уменьшению неоднородности пучка до 15 %. Замена сеточных электродов на многоапертурную электронно-оптическую систему формирования электронного пучка исключает рассеяние пучка на ускоряющем электроде и приводит к снижению потерь электронов пучка на нем до значений менее 5 %.

2. При воздействии ускоренного импульсного электронного пучка на непроводящую поверхность диэлектрика наведенный на ней отрицательный электрический потенциал возрастает с увеличением энергии электронов, тока пучка, длительности и частоты следования импульсов, но резко снижается с повышением давления газа и уже при 10 Па становится существенно меньше величины ускоряющего напряжения. Это обеспечивает возможность непосредственной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств непроводящих материалов, в том числе и различных керамик.

3. Облучение поверхности алюмооксидной керамики импульсным электронным пучком приводит к увеличению поверхностной микротвердости и снижению ее шероховатости, обуславливая, таким образом, существенное повышение ее эксплуатационных параметров. При этом для обработки пучком керамики целесообразно использование частотно-периодического режима облучения с плотностью энергии в импульсе, не превышающей 10 Дж/см^2, поскольку увеличение плотности энергии в импульсе не обеспечивает пропорциональное возрастание толщины модифицированного слоя, вследствие его испарения, но приводит к разрушению керамики из-за термических напряжений.

4. В широкоапертурном плазменном источнике электронов с многоапертурной системой извлечения и формирования пучка и центральной катодной вставкой, функционирующем в импульсно-периодическом режиме и форвакуумном диапазоне давлений при ускоряющем напряжении до 15 кВ и субмиллисекундном (20 мкс - 1 мс) диапазоне длительностей импульса при частоте их повторения до 50 Гц, получены однородные по сечению электронные пучки площадью 10 см^2 и более, с токами до 150 А и плотностью энергии в импульсе до 30 Дж/см^2, что делает возможным осуществление эффективной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств диэлектрических материалов.

Апробация. Результаты работ докладывались и обсуждались на: XI Международном симпозиуме по модификации материалов пучками заряженных частиц и потоками плазмы (Томск, 2012 г.); XVI Международном симпозиуме по сильноточной электронике (Томск, 2010 г.); IV Международном Крейнделевском семинаре «Плазменная эмиссионная электроника», (г. Улан-

Удэ, 2012 г.); XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2010, 2011 гг.,); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы естественных наук» (Новосибирск, 2011 г.); XVII и XVIII Всероссийских научных конференциях студентов-физиков и молодых ученых (Екатеринбург 2011 г., Красноярск 2012 г.); VII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2010 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск 2010, 2012 гг.).

Личный вклад автора состоит в создании экспериментальной установки, выборе методик эксперимента, проведении исследований и анализе их результатов. Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения, сделаны выводы и даны рекомендации, на основании которых разработана конструкция импульсного источника электронов. Соавторы, принимавшие участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации. Все результаты, составляющие научную новизну диссертации и выносимые на защиту, получены автором лично.

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликованы 22 работы, включая 5 статей в реферируемых журналах, получены патент на полезную модель и патент на изобретение.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, выполнена на 104 листах, содержит 52 рисунка и 3 таблицы, а также список литературы, включающий 94 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность, цель, научная новизна, научная и практическая ценность работы. Излагается краткое содержание диссертации, формулируются выносимые на защиту научные положения.

Первая глава *«Плазменные источники электронов для генерации пучков в форвакуумной области давлений»* носит обзорный характер и представляет собой критический анализ имевшихся к началу данной работы публикаций, посвященных широкоаппертурным источникам электронов, функционирующих в форвакуумной области давлений и их применению для обработки поверхности материалов с различными свойствами.

В разделе 1.1 рассмотрены особенности формирования непрерывных и импульсных электронных пучков при повышенных давлениях газа. Показано, что источники электронов, функционирующие в форвакуумном диапазоне давлений, представляют собой уникальный «инструмент» для осуществления поверхностной обработки различных, в том числе и диэлектрических, материалов. Сделан вывод, что неоднородное распределение плотности тока по сечению пучка форвакуумного источника существенно ограничивает круг задач его практического применения.

Раздел 1.2 посвящен анализу процессов взаимодействия электронного пучка с электрически изолированной металлической мишенью в форвакууме. Показано, что описание измерений потенциала отрицательного заряда, вносимого на поверхность мишени с малой электропроводностью, и зависимостей этого потенциала от параметров пучка для давлений форвакуумного диапазона в литературе отсутствуют, а использование проводящей изолированной мишени является достаточно грубым модельным приближением.

Раздел 1.3 посвящен рассмотрению физических и технических особенностей при обработке диэлектриков электронным пучком. Сделан вывод о перспективности этого процесса для современных технологий. Отмечается, что в работах[2] по обработке керамики импульсным электронным пучком параметры источника электронов были ограничены, что позволило зафиксировать факт изменения характеристик поверхности обработанной керамики, но не позволило сделать вывод о достижении оптимального режима ее обработки.

В разделе 1.4 сделаны выводы по первой главе и сформулированы задачи исследования.

Вторая глава *«Формирование однородного импульсного пучка большого сечения»* посвящена получению такого пучка в форвакуумном источнике с плазменным катодом.

Раздел 2.1 посвящен технике и методике эксперимента. Приведено описание конструктивных особенностей (рис. 1), принципа действия и параметров макета импульсного плазменного источника электронов для работы в форвакуумной области давлений. Генерация импульсного электронного пучка с током до 120 А, при токе разряда 150 А, длительностью импульса (регулируемая) от 10 до 1000 мкс, и частотой повторения (0,1 -50) Гц, в источнике обеспечивалась сочетанием импульсного режима горения разряда с постоянным напряжением на ускоряющем промежутке до 15 кВ в диапазоне давлений от 1 до 20 Па. Характерная осцилло-

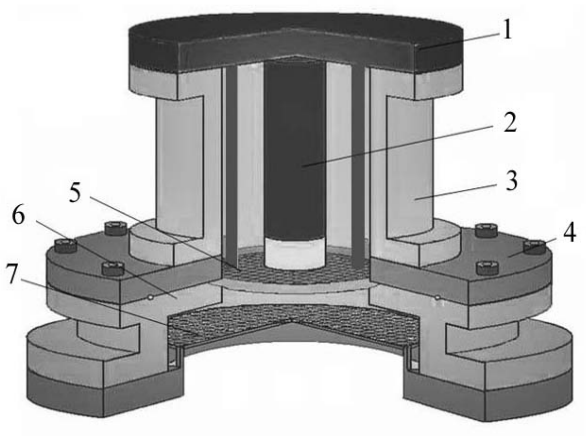

Рис. 1. Макет импульсного источника электронов. 1 - катодный фланец с цилиндрическим полым катодом, 2 - катодная вставка, 3 - изолятор разрядного промежутка, 4 - анодный фланец, 5 - анодная сетка, 6 - изолятор ускоряющего промежутка, 7 - сетка экстрактора.

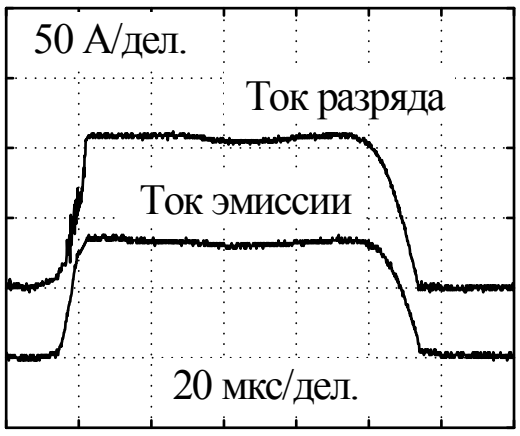

Рис. 2. Осциллограмма импульсов токов разряда и эмиссии при ускоряющем напряжении - 10 кВ, давлении - 12 Па.

грамма импульсов тока разряда и тока эмиссии электронов источника представлена на рис. 2. Рассмотрены методы измерения импульсных параметров разряда и пучка. Представлены вольтамперные характеристики электронного источника. Приведена конструкция трехкоординатной системы перемещения коллектора для измерения распределения плотности тока электронного пучка.

Раздел 2.2 посвящен исследованию распределения плотности тока по сечению электронного пучка. Экспериментально показано, что неоднородность распределения плотности тока пучка обусловлена не только неоднородностью концентрации эмиссионной плазмы, но и нарушением плоскопараллельной конфигурации сеточных электродов ускоряющей системы в процессе работы электронного источника.

Для улучшения однородности плазмы были проведены эксперименты по исследованию зависимости распределения плотности тока по сечению пучка от длины катодной вставки и определена ее оптимальная длина. Нарушение плоскопараллельной конфигурации сеточных электродов было устранено за счет использования системы с принудительным натяжением анодной сетки. Применение этих мер позволило обеспечить в сечении пучка диаметром 40 мм неоднородность распределения плотности тока, не превышающую 10 % от максимального значения при плотности тока пучка 0,6 А/см^2 (рис. 3).

Раздел 2.3 посвящен формированию электронного пучка с использованием многоапертурной системы извлечения. Отмечено, что при токах пучка в десятки – сотни Ампер с импульсом длительностью свыше 100 мкс применение сеточных электродов в ускоряющих системах источника приводит к потерям пучка (> 30 %) и снижает надежность работы источника, а применение многопертурных систем извлечения, широко используемых в ионных источниках, позволяет решить эту проблему. На основе численных расчетов с применением программы KOBRA – 3[3] был проведен предварительный анализ конструкции многоапертурной системы перед ее изготовлением. Экспериментально показано, что использование многоапертурной системы не приводит к увеличению неоднородности распределения плотности тока по сечению пучка, но уменьшает потери пучка на экстракторе. Найдено, что коэффициент токопрохождения (отношение тока на коллектор к полному току эмиссии) при достижении ускоряющим напряжением определенного значения (рис. 4) превышает величину 95 % (потери на экстракторе – 5%).

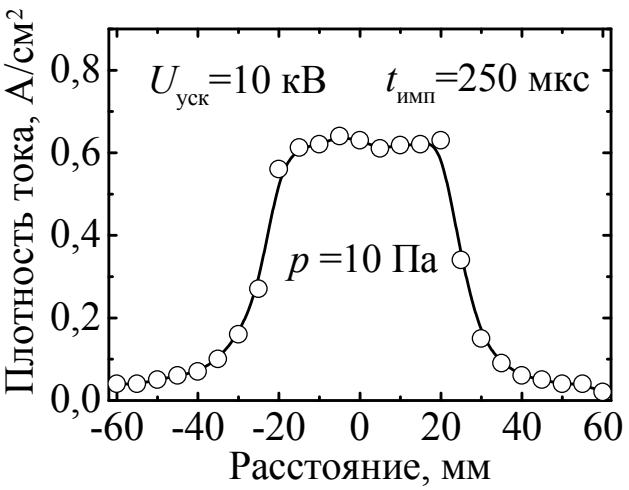

Рис. 3. Распределение плотности тока электронного пучка. Длина катодной вставки – оптимальная (65 мм), ток разряда - 40 А.

В разделе 2.4 приведены выводы по второй главе.

[3] Программа разработана П. Шпедтке (GSI, Германия).

Третья глава *«Электрический потенциал поверхности диэлектрической мишени при воздействии импульсного электронного пучка»* посвящена экспериментальному измерению этого потенциала.

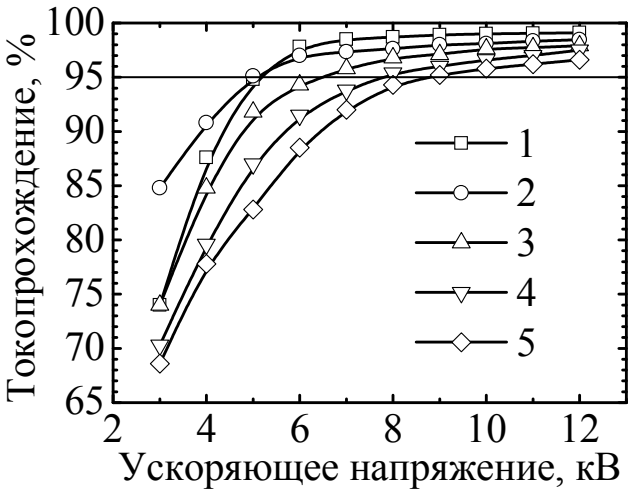

Рис. 4. Зависимости коэффициента токопрохождения от ускоряющего напряжения при различных значениях диаметра отверстий в аноде: 1 – 3мм, 2 – 3,5 мм, 3 – 4 мм, 4 – 4,5 мм, 5 – 5 мм. Диаметр отверстий в экстракторе - 5,5 мм. Давление - 4 Па. Ускоряющий зазор - 4,5 мм.

Раздел 3.1 представляет собой описание техники и методики эксперимента. Измерение потенциала поверхности диэлектрической пластины, заряжаемой электронным пучком, проводилось двумя независимыми методами: методом «конденсатора» (рис. 5) и методом «вторичных электронов» (рис. 6).

Суть метода конденсатора состоит в восстановлении потенциала на поверхности путем интегрирования измеренного тока зарядки и разрядки диэлектрика в переходных процессах при воздействии импульсного электронного пучка. Метод вторичных электронов заключался в измерении потенциала поверхности керамики по энергиям вторичных электронов, выбитых с нее пучком. Вторичные электроны ускоряются потенциалом, наведенным на поверхности, и их энергия измеряется магнитным энергоанализатором. По величине этой энергии определяется потенциал на

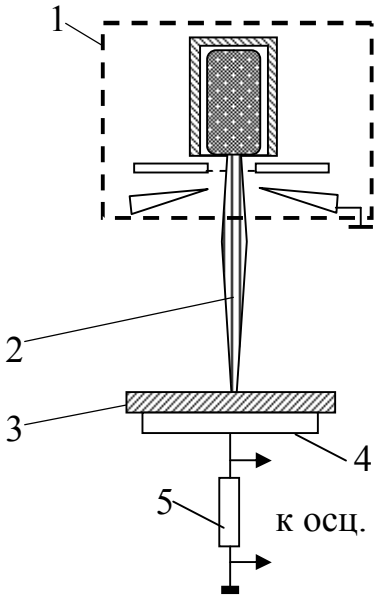

Рис. 5. Схема измерений потенциала методом «конденсатора». 1 - электронный источник, 2 – пучок, 3 – керамическая пластина, 4 - металлический держатель, 5 – измерительный резистор.

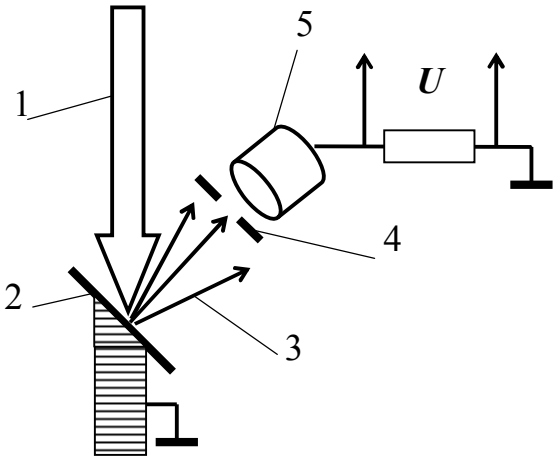

Рис. 6. Измерение потенциала по энергии вторичных электронов с помощью магнитного энергоанализатора. 1 – электронный пучок, 2 – керамическая мишень, 3 – вторичные электроны, 4 – диафрагма, 5 – магнитный энергоанализатор.

поверхности керамики. Оба метода дали удовлетворительное совпадение (в пределах 15 %, см. кривые 2 и 3 рис. 7) измерений потенциала поверхности керамики.

Раздел 3.2 посвящен экспериментам по исследованию потенциала поверхности керамики, заряжаемой импульсным электронным форвакуумным пучком. Показано, что отрицательный потенциал на поверхности керамики в (1,6 - 2,4) раза больше, чем потенциал изолированной металлической мишени, при прочих равных условиях (рис. 7). В отличие от изолированной металлической мишени, для керамической не обнаружено зависимости потенциала от площади мишени. При увеличении тока пучка потенциал поверхности керамики возрастает, приближаясь к насыщению при токах более 30 А (рис.8, кривая 1). Увеличение давления газа ведет к резкому снижению потенциала (рис. 8, кривая 2). Таким образам, для форвакуумных плазменных источников задача дальнейшего расширения рабочего давления в область более высоких попрежнему представляется актуальной проблемой. Однако уже при достигнутых рабочих давлениях (> 10 Па) установившийся потенциал керамической мишени не превышает 10 % от величины ускоряющего напряжения. Это исключает отражение электронов пучка от мишени отрицательным зарядом, вносимым на ее поверхность самим пучком.

Раздел 3.3 представляет собой выводы по третьей главе.

Рис. 7. Зависимость потенциала изолированного металлической коллектора (1) и поверхности керамики (2 – метод вторичных электронов, 3 – метод конденсатора) от ускоряющего напряжения. Ток пучка – 20 А, давление – 4 Па, длительность импульса – 225 мкс.

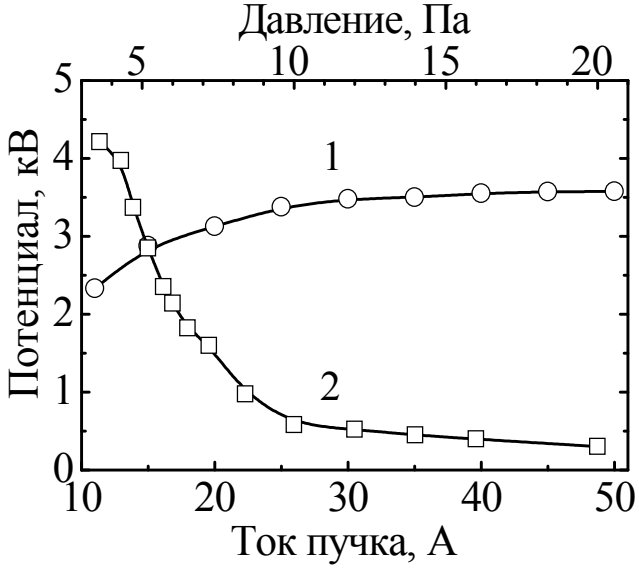

Рис. 8. Зависимость потенциала поверхности керамики от тока пучка (1 – нижняя шкала) и давления (2 - верхняя шкала). Ускоряющие напряжения - 13 кВ (1) и 15 кВ (2). Давление - 4 Па (1). Ток пучка - 20 А (2). Длительность импульса – 225 мкс.

Четвертая глава *«Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком»* посвящена экспериментальному исследованию этого процесса.

В *Разделе 4.1* приведено описание разработанного для модификации керамики импульсного форвакуумного электронного источника, основными компонентами которого являются (рис. 9): сам источник с системой защиты от рентгеновского излучения (1), система питания (2) и вакуумная камера (3). Предельные эксплуатационные параметры электронного источника представлены в таблице 1.

Рис. 9. Импульсный форвакуумный источник электронов.

Отмечено, что несмотря на то, что дополнительная фокусировка пучка магнитным полем позволяла получить плотность тока пучка на керамике до 20 А/см^2, что при 15 кВ ускоряющего напряжения и длительности импульса в 100 мкс обеспечивает 30 Дж/см^2 в импульсе, при обработке керамики мощность импульса должна быть ограничена величиной 10 Дж/см^2. Превышение этого значения вело к появлению микротрещин или раскалыванию керамики вследствие высоких термических напряжений. Перечислено оборудование, используемое для анализа поверхности керамики: бесконтактный профилометр Micro Measure 3D Station, микротвердомер Виккерса ZHV1-M, сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM-1000, оптические микроскопы МБС-10 и JJ-Optics Digital Lab.

Табл. 1. Параметры электронного источника.

Режим работы	Импульсный
Ускоряющее напряжение	до 15 кВ
Ток пучка	до 150 А
Длительность импульса	20 -1000 мкс
Частота повторения импульсов	до 50 Гц
Плотность энергии в импульсе на мишени	до 30 Дж/см^2
Мощность электронного пучка	до 3 кВт
Площадь сечения пучка с равномерностью 10%	10 – 20 см^2
Рабочий газ	Воздух, Ar, N_2 и др.
Давление рабочего газа	1 – 20 Па

В разделе 4.2 приведены результаты измерений толщины и свойств модифицированного электронным пучком приповерхностного слоя керамики. Указаны режимы обработки. Показано, что в результате обработки пучком образуется приповерхностный слой плавления керамики со структурой, отличной от

структуры исходного материала, толщиной единицы микрон (рис. 10). Результаты измерений, подтвержденные по порядку величины результатами численного моделирования тепловых процессов, показали, что, несмотря то, что плавление поверхностного слоя протекает за времена, много меньшие периода следования импульсов, толщина проплавленного слоя возрастает с увеличением общего числа импульсов. Показано, что это связано с постепенным нагреванием всего образца при его обработке в импульсно-периодическом режиме следования импульсов.

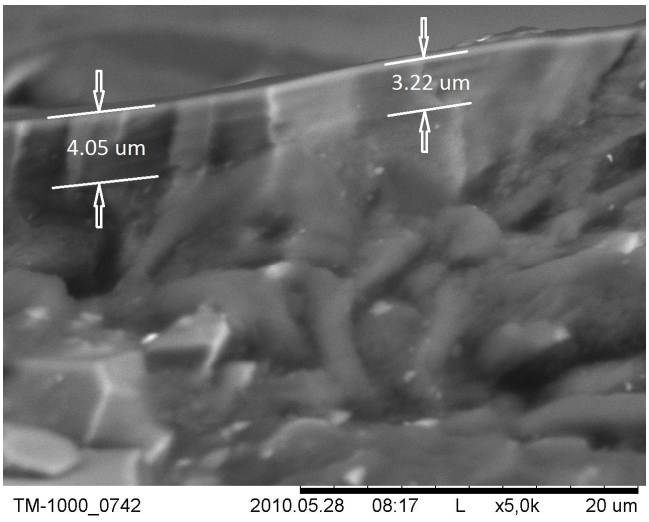

Рис. 10. Поперечный скол керамики, обработанной электронным пучком. Плотность энергии в импульсе - 10 Дж/см^2; 300 импульсов.

Профилометрические измерения показали заметное сглаживание модифицированной поверхности керамики по сравнению с исходной, что указывает на оплавление острых пиков. Измерения микротвердости поверхности показали увеличение твердости приповерхностного слоя более чем в 4 раза: с характерных для керамики 7 до 30 ГПа, что объясняется структурно-фазовыми изменениями при плавлении и последующей кристаллизации поверхности.

Раздел 4.3 посвящен исследованиям поверхности керамики, обработанной электронным пучком. На основании сравнения массы керамики до и после облучения было показано, что испарение керамики при плотности энергии в единицы Дж/см^2 происходит только в случае превышения периода следования импульсов над временем полного остывания керамики между импульсами. В результате был сделан вывод, что увеличение энергии в импульсе электронного пучка приводит не к возрастанию толщины расплавленной области, а к более резкому повышению температуры и, как следствие, к уносу вещества за счет испарения. Таким образом, для увеличения глубины модифицированной области керамики предпочтительнее использовать увеличение количества импульсов, а не повышение энергии пучка в импульсе.

Снимки с растрового микроскопа, позволяют проследить эволюцию трансформации поверхности керамики. Структура исходной поверхности керамики (рис. 11, а) состоит из преимущественно равноосных зёрен размером от 0,5 до 7 мкм и содержит полости, обеспечивающие остаточную пористость до 10 %. Облучение исследуемого материала электронным пучком при плотности энергии в импульсе на поверхности до 10 Дж/см^2 и частоте следования импульсов в единицы Герц не приводит к заметному уносу материала керамики за счет испарения, но существенным образом изменяет структуру поверхности (рис. 11, б). Она представляет собой застывший после расплавления слой с плотноупакованными областями размером менее микрона, что подтверждает изменение свойств поверхности керамики за счет рекристаллизации после

плавления исходных зерен кристаллитов.

На основании анализа спектров характеристического рентгеновского излучения, выявлено существенное снижение поверхностной концентрации кремния и кальция в облученной керамике по сравнению с исходной. Энергодисперсионный элементный анализ исследуемой керамики до и после электронно-лучевой обработки также подтверждает эффект поверхностной сегрегации примесей - оксидов кремния и кальция, присутствующих в исходных образцах в количестве до 1 ат.%. Указанный эффект может быть объяснен первоочередным испарением этих примесей при плавлении керамики под воздействием электронного пучка.

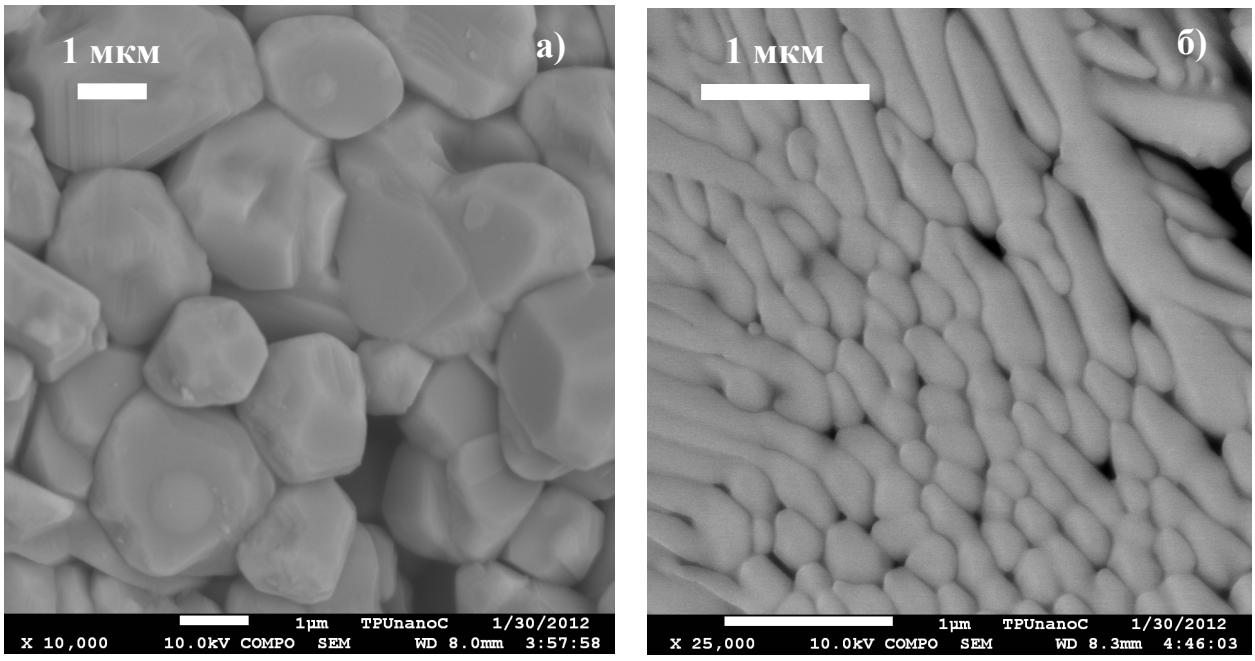

Рис. 11. Поверхность керамики: а – исходная, б - обработанная 100 импульсами. Энергия в импульсе - 10 Дж/см^2. Частота следования импульсов – 1 Гц.

В разделе 4.4 приведены выводы по четвертой главе.

В заключении изложены основные результаты работы, обоснована достоверность результатов исследований, отмечается личный вклад автора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Экспериментально показано, что неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка импульсного плазменного источника электронов на основе разряда с полым катодом, функционирующего в форвакуумном диапазоне давлений (1 – 20 Па), обусловлена радиальной неоднородностью распределения концентрации эмиссионной плазмы и неоднородностью пучка в области его формирования при нарушении плоскопараллельной конфигурации эмиссионного и ускоряющего сеточных электродов. Для улучшения однородности распределения плотности тока по сечению пучка предложено размещение на оси полого катода цилиндрической вставки и использование принудительного натяжения сетчатых электродов системы ускорения. Показано, что

указанные выше меры приводят к уменьшению неоднородности пучка до 15 %, а замена сеточных электродов на многоапертурную электронно-оптическую систему исключает рассеяние пучка и приводит к снижению потерь пучка на ускоряющем электроде с 30 % до значения менее 5 %.

2. Установлено, что при воздействии ускоренного импульсного электронного пучка на непроводящую поверхность наведенный на ней отрицательный электрический потенциал возрастает с увеличением энергии электронов, тока пучка, длительности и частоты следования импульсов, но резко снижается с повышением давления газа и уже при 10 Па становится существенно меньше величины ускоряющего напряжения. Это обеспечивает возможность непосредственной электронно-лучевой модификации поверхностных свойств непроводящих материалов, в том числе и различных керамик.

3. Показано, что облучение поверхности алюмооксидной керамики импульсным электронным пучком приводит к увеличению поверхностной микротвердости в 4 раза и снижению ее шероховатости, обуславливая, таким образом, существенное повышение эксплуатационных параметров и характеристик керамических деталей и изделий. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных зависимостей показано, что для обработки электронным пучком керамики целесообразно использование «многоимпульсного» режима облучения с плотностью энергии в импульсе, не превышающей 10 Дж/см^2. Такой режим позволяет избежать механического разрушения образца, наблюдаемого из-за возникающих термических напряжений в случае одиночных импульсов с высокой плотностью энергии.

4. Найдено, что увеличение энергии в импульсе приводит не к возрастанию толщины расплавленной области поверхности керамики, а к более резкому повышению температуры и, как следствие, к уносу вещества за счет испарения. Сделан вывод о том, что для увеличения глубины модифицированной области предпочтительнее использовать увеличение количества импульсов, а не повышение энергии пучка в импульсе.

5. Показано, что в широкоапертурном плазменном источнике электронов с многоапертурной системой формирования электронного пучка и центральной катодной вставкой могут быть получены однородные по сечению пучки площадью 10 см^2 и более. При функционировании источника в импульсно-периодическом режиме и форвакуумной области давлений (1 – 20 Па) при ускоряющем напряжении до 15 кВ и субмиллисекундном диапазоне длительности импульса, плотность энергии пучка в единичном импульсе может составлять до 30 Дж/см^2, что при частоте повторения 50 Гц обеспечивает среднюю мощность электронного пучка в 3 кВт. На основе экспериментальных исследований определено, что такие параметры пучка обеспечивают эффективную электронно-лучевую модификацию поверхностных свойств керамических материалов за счет плавления и испарения их поверхностного слоя.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ю.Г. Юшков, В.А. Бурдовицин А.В. Медовник, Е.М. Окс. Форвакуумный плазменный источник импульсных электронных пучков // Приборы и техника эксперимента, 2011, №2, с. 85 - 88.
2. Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. Потенциал диэлектрической мишени при ее облучении импульсным электронным пучком в форвакуумной области давлений // Журнал технической физики, 2012, Т. 82, вып. 10., с. 103 - 108.
3. Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Скробов Е.В., Юшков Ю.Г. Модификация поверхности керамики импульсным электронным пучком, генерируемым форвакуумным плазменным источником // Перспективные материалы, 2011, №6, с. 1-6.
4. Юшков Ю.Г., Окс Е.М., Медовник А.В., Бурдовицин В.А. Распределение плотности тока по сечению импульсного электронного пучка в форвакууме // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Ч. 2, декабрь 2011, с. 161 - 163.
5. В.А. Бурдовицин, Э.С. Двилис, А.В. Медовник, Е.М. Окс, О.Л. Хасанов, Ю.Г. Юшков. Структура поверхности алюмооксидной керамики при облучении импульсным электронным пучком // Журнал технической физики, 2013, том 83, вып. 1., стр. 117 – 120. (в печати, текст статьи доступен на сайте ЖТФ: http://journals. ioffe.ru/jtf/2013/01/page-117.html.ru).
6. Medovnik A.V., Oks E.M., Yushkov Yu.G. Fore-Vacuum Pulsed Plasma Electron Source // Proc. 16th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2010, p. 23 – 25.
7. Юшков Ю.Г. Форвакуумный импульсный источник электронов с плазменным катодом для модификации поверхности непроводящей керамики // Труды IV международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника», Улан-Удэ, 2012, с. 118 - 124.
8. Юшков Ю.Г., Поздеев Е.Э., Медовник А.В. Плазменные процессы в области транспортировки пучка электронов форвакуумного источника с плазменным катодом// Труды Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» 2010, с. 53 - 56.
9. Юшков Ю.Г., Медовник А.В. Модификация алюмооксидной керамики электронно-импульсным способом // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современные материалы, техника, технология», Курск, 2011, с. 362 - 363.
10. Юшков Ю.Г., Скробов Е.В. Расчет температурного профиля при облучении алюмооксидной керамики электронным пучком // Труды Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 2010, с. 56 - 59.
11. Юшков Ю.Г. Исследование поверхности алюмооксидной керамики при обработке импульсным электронным пучком в форвакууме // Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы естественных наук», Новосибирск, 2011, с. 81 - 86.

12. Малышкин А.А, Медовник А.В, Юшков Ю.Г. Моделирование многоапертурной системы ускоряющего промежутка в импульсном форвакуумном источнике электронов// Труды XVIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии, СТТ- 2012», Томск, 2012, с. 41 - 42.
13. Юшков Ю.Г., Медовник А.В. Генерация импульсных электронных пучков в плазменном форвакуумном источнике с кольцевой эмиссионной поверхностью// Доклады VII Международной конференции студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 2010, с. 216 - 218.
14. Юшков Ю.Г., Харченко А.С. Импульсный электронный пучок для модификации поверхности керамики // Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР, 2010», Томск, 2010, с. 24 - 26.
15. Юшков Ю.Г. Форвакуумный электронный источник для обработки поверхности диэлектриков // Труды Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Екатеринбург, 2011, с. 264 - 266.
16. Юшков Ю.Г. Изменение поверхностных свойств керамики при импульсном электронно-лучевом воздействии // Труды Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Екатеринбург, 2011, с. 615 - 616.
17. Юшков Ю.Г., Медовник А.В., Бурдовицин В.А. Модификация структуры и трибологических свойств керамики импульсным электронным пучком // Труды Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Красноярск, 2012, с. 644 - 645.
18. Юшков Ю.Г., Медовник А.В., Бурдовицин В.А. Особенности импульсного источника электронов функционирующего в форвакуумной области давлений // Труды Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, Красноярск, 2012, с. 279 - 280.
19. Юшков Ю.Г., Медовник А.В., Малышкин А.А. Измерение температуры керамики при облучении импульсным электронным пучком в форвакууме // Труды Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР, 2012», Томск, 2012, Т. 2, с. 141 - 143.
20. Юшков. Ю.Г. Электронный источник с плазменным катодом для модификации поверхностей диэлектриков в форвакууме // Доклады лауреатов Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук, Томск, 2011, с. 119 - 120.
21. Юшков Ю.Г. Импульсное электронно-лучевое устройство для модификации поверхности керамики // Сборник работ победителей отборочного тура Всероссийского конкурса научно-исследовательских работ студентов, аспирантов и молодых ученых по междисциплинарным направлениям, Новочеркасск, 2011, с. 219 - 221.
22. Юшков Ю.Г. Импульсный электронный источник с плазменным полым катодом для модификации непроводящей керамики // Сборник научно-

исследовательских работ студентов и аспирантов в области физических наук, Томск, 2010. с. 7 - 12.
23. Медовник А.В., Бурдовицин В.А., Окс Е.М., Юшков Ю.Г. // Патент РФ № 107657 на полезную модель «Форвакуумный плазменный электронный источник», 2011.
24. Бурачевский Ю.А., Бурдовицин В.А., Медовник А.В., Окс Е.М., Юшков Ю.Г. // Патент РФ на изобретение №2439742 «Способ плазменного анодирования металлического или полупроводникового объекта», 2012.