



НИИЭФА
РОСАТОМ

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НИИЭФА им. Д.В. Ефремова»
(АО «НИИЭФА»)

196641, Санкт-Петербург, поселок Металлострой, дорога на Металлострой, дом 3

Телефон: (812) 464-89-63, факс: (812) 464-79-79, <http://www.niiefa.spb.su>

ОКПО 008626377, ОГРН 1137847503067, ИНН / КПП 7817331468 / 781701001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

А.В. Ванин

2020 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Куркучекова Виктора Викторовича «Пространственно-угловые характеристики электронного пучка, полученного в мультиапертурном источнике с плазменным эмиттером», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — Физика плазмы

Актуальность темы диссертационной работы

Пучки электронов с мощностью 1–10 МВт и длительностью импульса от десятков до сотен микросекунд и энергией до нескольких сот кэВ в настоящее время широко используются во многих научных и технологических сферах. Среди научных применений следует, прежде всего, отметить их применение в различных исследованиях, посвященных развитию открытых ловушек, технологических – это моделирование импульсных тепловых нагрузок на элементы конструкции установок термоядерного класса, модификации поверхности материалов и др.

Одним из главных преимуществ применения мощных электронных пучков является гибкость параметров и довольно однородная тепловая нагрузка на большой и хорошо определенной области, относительно слабое сопутствующее излучение.

Особо следует отметить возможность применения пучков данного класса пучков для воздействия на поверхностный слой металлов с целью придать новые физические и химические свойства, недоступные традиционным технологиям. При тепловом воздействии импульсного электронного пучка с плотностью мощности 5–50 ГВт/м² происходит быстрый нагрев, плавление и последующая

закалка поверхностного слоя, и как следствие в зоне термического воздействия происходят микроструктурные преобразования, существенно изменяющие свойства материала, прежде всего шероховатость поверхности, твердость, коррозионная стойкость и т. д.

Для успешного применения пучков электронов необходима информация о пространственных и угловых характеристиках электронного пучка, которая позволяет корректно провести оценку тепловой нагрузки на мишень, учет угловых характеристик важен при транспортировке и компрессии пучка во внешнем магнитном поле. Следовательно, экспериментальное изучение пространственных и угловых характеристик мощного электронного пучка, полученного в источнике с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной электронно-оптической системой (ЭОС), безусловно, является **актуальной темой**.

Анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 139 страниц с 58 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 86 наименований.

Содержание работы

В введении дается обоснование актуальности проводимых исследований, в рамках диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, подлежащие рассмотрению.

В первой главе приведено описание условий эксперимента на установке ГОЛ-3 и стенде ВЕТА. Генерация электронного пучка осуществлялась с помощью источника с дуговым плазменным эмиттером и мультиапертурной ЭОС, обеспечивающих получение пучков электронов с широким диапазоном параметров: ток пучка 1–100 А, ускоряющее напряжение 45–110 кВ при длительности импульса до нескольких миллисекунд.

Вторая глава диссертации посвящена измерению пространственных характеристик несжатого пучка. Приведен обзор методик, применяемых для измерения распределения плотности тока пучков заряженных частиц. Предложена простая диагностическая система на основе рентгеновской камеры-обскуры.

Приведено описание экспериментального оборудования, используемого для измерения характеристик электронного пучка.

В третьей главе представлены полученные экспериментальные результаты измерений пространственных характеристик электронного пучка от источника с дуговым плазменным катодом и мультиапертурной ЭОС.

В четвертой главе описаны результаты измерений пространственных характеристик электронного пучка после магнитной компрессии. Отмечается, что

пространственного разрешения описанной ранее диагностики недостаточно для наблюдения дискретного распределения тока пучка, но оно позволяет проводить оценку уровня тепловой нагрузки на поверхности мишени.

Проведено сравнение полученных результатов с расчетами в пакете CST studio. Полученные с помощью моделирования результаты качественно согласуются с экспериментом.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы. В экспериментах по измерению пространственных характеристик пучка получены следующие результаты:

Разработаны методики диагностики параметров электронного пучка на основе рентгеновской визуализации, позволяющие измерять в одном рабочем импульсе распределение плотности в поперечном сечении и проведены экспериментальные исследования, доказывающие их применимость.

Показано, что изначально дискретная, многоструйная структура пучка сохраняется при его транспортировке в ведущем магнитном поле, если ток пучка достаточно мал. Наличие угловой расходимости скоростей электронов приводит к радиальным колебаниям огибающей отдельных струек, составляющих пучок. Соответствующим подбором ускоряющего напряжения и (или) величины ведущего магнитного поля, можно достичь как дискретного, так и гладкого распределения тока пучка в плоскости мишени.

Регистрация дискретной структуры пучка дает инструмент для измерения величины эмиссионного тока в каждой отдельной апертуре непосредственно на выходе из ускорительного диода.

По мере увеличения тока пучка выше ~ 20 А наблюдается «размытие» дискретного распределения, вне зависимости от энергии электронов пучка и величины ведущего магнитного поля. Численным моделированием показано, что данный эффект может быть объяснен влиянием пространственного заряда пучка.

При исследовании угловых характеристик пучка были получены экспериментальные данные по угловым характеристикам электронного пучка, формируемого в мультиапертурном диоде с плазменным эмиттером. Показано, что угловое распределение скоростей электронов хорошо описывается функцией Гаусса со стандартным отклонением $\sigma \sim 0,03 - 0,08$ рад, в зависимости от геометрии ЭОС.

Показано, что в экспериментально доступном диапазоне параметров (60–100 кэВ и 20–80 А) угловые характеристики пучка практически не зависят от величины тока эмиссии и ускоряющего напряжения. Проведено численное моделирование электронной оптики единичной апертуры с учетом свободной плазменной эмиссионной границы. Результаты моделирования согласуются с экспериментом.

Научная новизна

Научная новизна в данной работе отслеживается при рассмотрении следующих вопросов:

1. Детальном исследовании пространственных характеристик электронного пучка, сформированного в источнике на основе мультиапертурной ЭОС и плазменного катода со свободной эмиссионной поверхностью, транспортируемого в ведущем магнитном поле, а также экспериментальном доказательстве возможности получения гладкого поля облучения на плоскости мишени, несмотря на изначально дискретную, многоструйную структуру пучка.

2. В подходе, позволяющем с помощью изображающей рентгеновской диагностики измерить вклад каждой отдельной апертуры ЭОС в полный эмиссионный ток.

3. В исследовании угловых характеристик электронного пучка в системе с мультиапертурной ЭОС и плазменным эмиттером.

Практическая значимость работы

Результаты по измерению пространственных характеристик пучка могут быть использованы для оценки удельной нагрузки на исследуемые образцы при моделировании импульсных тепловых нагрузок, либо при электронно-лучевой обработке металлов. Кроме того, угловые характеристики пучка являются критически важными при инжекции в открытые плазменные ловушки.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошей воспроизводимостью, а также сравнением результатов полученных с использованием независимых диагностик. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами численного моделирования. Приведённые выводы сформулированы на основе большого массива экспериментальных данных.

Апробация работы

Апробация работы: доклады и статьи о работах по теме диссертации были представлены на четырех международных конференциях, опубликованы в российских и зарубежных научных журналах, три из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Замечания по диссертации

По содержанию и оформлению диссертации и автореферата считаем необходимым сделать ряд замечаний:

1. При исследовании распределения тока эмиссии по апертурам ЭОС сравниваются только две конфигурации электродов - с 85 и 241 отверстиями. Было бы интересно провести аналогичное сравнение с ЭОС, имеющей произвольное число апертур, рассмотреть возможность нахождения зависимости конфигурации электродов на параметры распределения и рассмотреть возможные способы управления данным распределением.

2. При выборе материала рентгеновского конвертера производится оценка выхода рентгеновского излучения. Для оценки используется некоторая эмпирическая модель, при этом описание модели ограничивается ссылкой на статью источник. Не совсем понятно, почему автор использовал именно эту модель, а не численные коды, в том числе, имеющиеся в открытом доступе (например, LANT).

3. В работе приводится оценка степени компенсации пространственного заряда пучка, при этом не уточняются механизмы её возникновения.

4. При исследовании угловых характеристик пучка рассматривались различные конфигурации ЭОС, отличающиеся величиной ускоряющего зазора и диаметром анодных отверстий. Для полноты картины не хватает экспериментальных данных об угловых характеристиках пучка при различных диаметрах эмиссионных апертур катодного электрода.

5. В тексте имеются опечатки, например: в формуле 2.10 потеряна скобка; на странице 65 автор ссылается на формулу 3.7, хотя имеется ввиду формула 3.3.

Указанные замечания не снижают ценности представленной работы в целом, носят исключительно рекомендательный характер и могут быть учтены автором при проведении дальнейших исследований.

Заключение

Диссертация представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную автором на высоком научном уровне. Представленные в работе результаты исследований достоверны, выводы, заключения и рекомендации строго аргументированы и обоснованы. Результаты работы опубликованы, апробированы и внедрены. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа Куркучекова Виктора Викторовича на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук «Пространственно-угловые характеристики электронного пучка, полученного в мультиапертурном

источнике с плазменным эмиттером» по специальности 01.04.08 — физика плазмы, удовлетворяет критериям, установленным в п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённых постановлением правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., и представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для диагностики мощных электронных пучков, используемых в научных и технологических сферах.

Работа достойна положительной оценки, а её автор - Куркучеков Виктор Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 — физика плазмы.

Отзыв ведущей организации на диссертацию и автореферат Куркучекова Виктора Викторовича обсуждался на заседании секции научно-технического совета "Ускорители заряженных частиц и электрофизические установки на их основе" Акционерного общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», протокол № 97 от 14 августа 2020 г.

Председатель секции НТС,
д-р физ.-мат.наук



Ю.Н. Гавриш

Ученый секретарь секции НТС,
канд. физ.-мат.наук



Ю.В. Зуев