

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертацию

Куркучекова Виктора Викторовича

“Пространственно-угловые характеристики электронного пучка, полученного в мультиапертурном источнике с плазменным эмиттером”

по специальности 01.04.08 – физика плазмы,

представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Актуальность темы диссертации.

В работе приведены результаты экспериментального исследования угловых и пространственных характеристик электронного пучка, полученного в источнике с плазменным эмиттером и мультиапертурной электронно-оптической системой (ЭОС). Разработанный в ИЯФ СО РАН источник позволяет получать пучки с мощностью 1-10 мВт, энергией электронов до 110 кэВ при длительности импульса до нескольких миллисекунд. Подобный класс пучков является востребованным инструментом для ряда приложений. В настоящий момент данный источник включен в состав экспериментального стенда ВЕТА, где используется для моделирования импульсных тепловых нагрузок на элементы конструкции и материалы будущих термоядерных установок в рамках программы ИТЭР. Информация о характеристиках пучка является ключевой для данных исследований. Таким образом, исследования, составившие основу диссертационной работы, являются весьма важными и актуальными.

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертационной работы, формулируются цель и задачи, решению которых посвящена работа.

В первой главе приведено описание источника электронного пучка на основе плазменного эмиттера и мультиапертурной ЭОС. Подробно описаны экспериментальные условия на установке ГОЛ-3 и стенде ВЕТА.

Во второй главе диссертации приведен литературный обзор методик, применяемых для измерения распределения плотности тока пучков заряженных частиц. На основе данного обзора предложены две схемы диагностики: с использованием рентгеновской камеры-обскуры и тонкого рентгеновского конвертера с люминофором. Сравнение предложенных схем диагностики проведено экспериментально на установке ГОЛ-3 и стенде ВЕТА.

Подробно описывается общая схема постановки экспериментов. Приводится обоснование выбора конструкции и материалов, используемых в диагностических устройствах. Экспериментально демонстрируется линейность зависимости яркости рентгеновских изображений отпечатка пучка от плотности потока электронов. Приводятся измерения разрешающей способности диагностик. На основе проведенного сравнения в качестве основной выбрана схема с использованием тонкого рентгеновского конвертера с люминофором.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований пространственных характеристик пучка до его сжатия в ведущем магнитном поле. Показано, что изначально дискретная структура пучка, обусловленная многоапертурной конфигурацией электродов

Впервые выполнено исследование угловых характеристик электронного пучка в системе с мультиапертурной ЭОС и плазменным эмиттером. Показано, что в режиме эмиссии, далеком до ограничения по пространственному заряду, угловая расходимость пучка определяется геометрией электродов ЭОС и практически не зависит от величины тока эмиссии и ускоряющего напряжения.

Практическая и научная значимость полученных в диссертации результатов заключается в возможности их применения в текущих экспериментах по моделированию импульсных тепловых нагрузок в интересах программы ИТЭР, проводимых на стенде ВЕТА, ИЯФ СО РАН. Материал, изложенный в диссертации, может также представлять интерес при проектировании и создании новых источников электронных пучков с использованием плазменного эмиттера.

Замечания по диссертационной работе

1. Для объяснения слабого влияния тока и энергии электронов в пучке на его угловые характеристики автор провел численное моделирование, в результате которого им было установлено существование кроссовера вблизи эмиттерного электрода ЭОС. Такой режим фокусировки обусловлен значительной кривизной эквипотенциалей ускоряющего поля на периферии апертуры и приводит к появлению в пучке электронов со значительной угловой расходимостью. К сожалению, автор ограничился использованием этого важного результата только для объяснения постоянства угловых характеристик пучка, тогда как несомненный интерес представляет и обсуждение возможности оптимизации геометрии апертур ЭОС и ее влияния на формирование и предельно достижимые параметры электронного пучка.

2. При обсуждении эксперимента по оценке однородности распределения эмиссионного тока по отверстиям ЭОС автор сравнил результаты для двух ЭОС, различающихся числом и размером апертур и сделал вывод о том, что распределение эмиссионного тока не зависит от конфигурации ЭОС. Результат предсказуемый, поскольку степень неоднородности эмиссии электронов определяется, главным образом, распределением плотности плазмы в полном аноде, на которое оказывает влияние индукция продольного магнитного поля, но это влияние не исследовалось. Дополнительными факторами, влияющими на эмиссию плазмы, могут быть обратный ионный поток и изменение соотношения между размером пристеночного слоя пространственного заряда и размером апертуры, но в условиях эксперимента их влияние несущественно. Это стоило отметить.

3. Чтобы продемонстрировать внимательное прочтение оппонентом диссертации отмечу, что очень много запятых либо стоят не на своем месте, либо вообще отсутствуют. Автор явно не согласен с правилом «оловянный, деревянный, стеклянный» и при любой возможности вставляет в прилагательные вторую букву «н». Кроме того, подпись к рис. 3.7. ошибочна. Но это мелочи.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

В целом, диссертационная работа В.В. Куркучекова выполнена на высоком научном уровне и содержит решение сложных экспериментальных задач в области физики и техники генерации мощных импульсных электронных пучков в мультиапертурном источнике с плазменным

ЭОС, сохраняется при его транспортировке во внешнем магнитном поле, если ток пучка достаточно мал (< 5 А). Увеличение тока пучка приводит к размытию дискретной структуры пучка. С помощью численного моделирования демонстрируется, что данный эффект может быть обусловлен влиянием пространственного заряда пучка.

Показано, что элементарные пучки формируются во всех апертурах ЭОС. Перепад величины тока эмиссии между центральными и периферийными апертурами ЭОС составляет ~ 70 %.

По наблюдаемому вращению пучка проведены оценки степени компенсации пространственного заряда. Согласно приведенным результатам эффективный уровень компенсации ≥ 50 %.

Четвертая глава посвящена измерению пространственных характеристик пучка после магнитного сжатия. Для измерения распределения плотности тока сжатого пучка использовалась рентгеновская изображающая диагностика, принципиально аналогичная описанной во второй главе, однако, адаптированная к возросшим плотностям мощности.

Распределение тока пучка, наблюдаемое с помощью данной диагностики, хорошо описывается функцией Гаусса. Экспериментально продемонстрировано, что характерный размер пучка изменяется в зависимости от коэффициента компрессии согласно с потоком магнитного поля. Важным результатом является демонстрация возможности обеспечения плотности мощности, поглощенной вольфрамовой мишенью, в 25 ГВт/м², что сопоставимо с нагрузками, ожидаемыми во время переходных процессов в будущих установках реакторного типа.

Пятая глава содержит литературный обзор методик, применяющихся для измерения углового разброса пучков заряженных частиц. На основе данного обзора был выбран метод «repper pot». Приведено подробное обоснование выбора параметров диагностики и методики обработки результатов.

Исследованы угловые характеристики пучка, полученного в источнике с плазменным эмиттером. Приведены зависимости угловых характеристик пучка от величины тока пучка, ускоряющего напряжения и геометрии электродов ЭОС. Показано, что измеренные угловые характеристики согласуются с прохождением пучка через магнитную пробку. С помощью численного моделирования приведено объяснение наблюдаемым зависимостям.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Среди результатов, обладающих **научной новизной**, отметим следующие.

Выполнено детальное исследование пространственных характеристик электронного пучка, сформированного в источнике на основе мультиапертурной ЭОС и плазменного катода со свободной эмиссионной поверхностью, транспортируемого в ведущем магнитном поле.

Экспериментально показана возможность получения равномерного распределения тока по поверхности мишени, несмотря на изначально дискретную, многоструйную структуру пучка.

Найден оригинальный подход, позволяющий с помощью изображающей рентгеновской диагностики измерить вклад каждой отдельной апертуры ЭОС в полный эмиссионный ток.

эмиттером. Диссертация представляет собой законченное исследование. Результаты работы достаточно полно представлены в публикациях автора. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

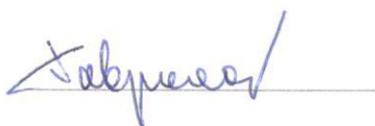
Таким образом, диссертация Куркучекова Виктора Викторовича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, её автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Официальный оппонент,

д.т.н., член-корр. РАН, заведующий лабораторией пучков частиц ФГБУН «Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук»

620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, Тел.: (343) 267-87-96

e-mail: gavrilov@ier.uran.ru



Гаврилов Николай Васильевич

5 августа 2020 г.

Подпись Гаврилова Николая Васильевича заверяю:

Зам. директора ИЭФ УрО РАН,

д.ф.-м.н.



/Болтачев Г.И./

«11» августа 2020 г.