

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Московского
государственного университета
имени М.В.Ломоносова

Д.ф.-м.н., профессор

А.А. Федянин



А.А. Федянин
02.11. 2023 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» на диссертационную работу Самцова Дениса Алексеевича «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Диссертационная работа Самцова Дениса Алексеевича посвящена исследованию генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности.

В течение последних двадцати лет был достигнут значительный прогресс в этой области. Лазеры на свободных электронах позволяют получить импульсы излучения мощностью до 1 МВт при длительности несколько десятков пикосекунд в диапазоне 1.2–2.5 ТГц. Мощность излучения гиротронов в диапазоне 0.1–0.7 ТГц лежит в пределах 0.2–1 МВт. Используемый в работе способ формирования излучения с помощью релаксации килоамперного электронного пучка позволил получить излучение мощностью 8 МВт микросекундной длительности в диапазоне 0.1–0.3 ТГц. На сегодняшний момент параметры излучения являются одними из максимально полученных, поэтому как тему диссертации, так и представленные в ней результаты следует считать **важными и актуальными.**

Остановимся кратко на **общей характеристике** диссертации.

По своей структуре, содержанию и объему диссертационная работа выполнена и подготовлена в соответствии с действующей системой стандартов и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 129 страницах, включая 50 рисунков,

6 таблиц и 86 наименований используемых литературных источников.

Во введении изложена история вопроса, перечислены основные методы генерации волн терагерцового диапазона, реализуемые в различных экспериментальных группах, поставлены основные задачи, решаемые автором. Обсуждается общая мотивировка решаемых задач, проведен обзор литературы по теме диссертации, сформулированы положения, выносимые на защиту, приводится краткое содержание работы.

В первом разделе диссертационной работы описаны установка ГОЛ-ПЭТ и комплекс используемых диагностик, которые предназначены для исследования генерации потока терагерцового излучения.

Второй раздел работы посвящен описанию экспериментов, в которых создавалась предварительная плазма, в которую инжектировался килоамперный пучок электронов. Описан способ реализации высоковольтного разряда и формирования с его помощью плазменного столба с заданной средней плотностью и с требуемыми градиентами плотности электронов в продольном (осевом) и радиальном направлениях. Показано, что возможно формирование плазмы с плотностью выше 10^{14} см⁻³ с помощью изменения схемы подключения электродов.

В третьем разделе описаны эксперименты по измерению углового разброса электронов инжектируемого пучка в течение импульса при различном магнитном поле в диоде, используемом для генерации пучка, и различном напуске нейтрального газа для обеспечения нейтрализации пучка. Показано, что в течение первых 3–4 микросекунд средний угловой разброс электронов не изменяется. К концу импульса происходит перераспределение тока пучка по сечению. Увеличение магнитного поля пучка приводит к уменьшению углового разброса пучка и росту его плотности в фазовом пространстве.

Четвертый раздел посвящен описанию экспериментов по исследованию характеристик терагерцового излучения. В эксперименте реализованы три варианта генерации излучения:

1. Возбуждение верхне-гибридных волн в однородной плазме в случае, если частота электронно-циклотронных колебаний близка к частоте ленгмюровских колебаний плазмы. В рассматриваемом случае результаты эксперимента сопоставлены с теоретическими.

2. Возбуждение колебаний при формировании радиального градиента плотности.

3. Возбуждение колебаний при резком понижении плотности плазмы на ее торце.

В случаях 2 и 3 реализовывался режим сильной турбулентности, который сопровождался флуктуациями мощности и спектра излучения.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Впервые достигнуты рекордные значения энергии (5–7 Дж) и мощности

(8 МВт) в потоке излучения при микросекундной длительности.

2. Впервые измерено распределение по питч-углу пучка электронов с током 10 кА и энергией 0.5 МэВ перед инъекцией этого пучка в плазменный столб.

3. Впервые экспериментально изучено влияние параметров замагниченного плазменного столба на мощность и спектральный состав генерируемого излучения.

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в том, что они могут быть использованы для верификации разрабатываемых в настоящее время теоретических моделей генерации терагерцового излучения с помощью электронного пучка в замагниченной плазме и вывода энергии этого излучения из плазмы в окружающее пространство.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1. Показано, что используемая в работе концепция установки позволяет генерировать терагерцовое излучение с рекордными мощностями и длительностями.

2. Полученный в работе направленный поток излучения может быть использован для изучения воздействия на различные объекты и материалы.

В диссертации использованы следующие **методы исследования** параметров плазмы, электронного пучка и излучения:

1. Угловое распределение скорости электронов в релятивистском пучке исследовалось с помощью контактного датчика.

2. Локальные параметры плазмы измерялись с помощью лазерного интерферометра, а также томсоновского рассеяния.

3. Спектральный состав генерируемого излучения измерялся с помощью селективных датчиков на основе диодов с барьером Шоттки.

4. Полная мощность излучения измерялась с помощью калориметра.

Синхронная работа всех экспериментальных датчиков, сбор и обработка полученных данных проводились с помощью комплекса компьютерных программ.

Достоверность полученных результатов подтверждается многократным проведением экспериментов, контролем ключевых параметров экспериментальной установки (параметров пучка, плазмы, магнитного поля, излучения), использованием надежных методов измерений и многократной калибровки используемой аппаратуры.

Апробация результатов. По результатам диссертационной работы были опубликованы 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых Scopus и рекомендованных ВАК, а также в тезисах, опубликованных в сборниках трех научных конференций. Основные результаты были представлены на тематических международных конференциях.

По работе можно сделать **следующие замечания:**

1. Несмотря на полученные в работе рекордные параметры излучения, КПД установки в целом оказывается низким. Однако вопросы повышения КПД, которые существенны для такого рода работ, в диссертации не обсуждаются.

2. В работе для удержания плазмы используется многоголовушечная конфигурация магнитного поля. Было бы интересно понять, играет ли какую-либо роль в генерации излучения связанная с этим неоднородность плазмы.

3. Работу полезно было бы дополнить обзором работ по теории рассматриваемых процессов.

4. Из работы сложно сделать вывод, преобладает в генерации терагерцовых волн чисто пучковый механизм, связанный с продольным движением электронного пучка, или циклотронное вращение электронов также участвует в формировании условий синхронного взаимодействия волны с пучком.

5. Интересен также вопрос, на какой длине происходит релаксация пучка, связанная с генерацией излучения, т.е. можно ли уменьшить длину плазменного столба или ее следует увеличить.

Сделанные замечания нисколько не умаляют проделанной автором большой экспериментальной работы и полученных им результатов.

На основе вышесказанного можно сделать **следующие выводы:**

Тема диссертации Самцова Д.А. важна и актуальна. Работу следует отнести к научной специальности 1.3.9. Физика плазмы.

В процессе исследований в рамках диссертационной работы автором экспериментально решена задача создания потока электромагнитных волн в диапазоне 0.1–0.6 ТГц вдоль оси замагниченного плазменного столба при релаксации в нем сильнооточного релятивистского электронного пучка. Уровень мощности полученного излучения около 10 МВт, а энергия в импульсе – 5–7 Дж.

Генерация данного излучения осуществлялась в несколько стадий:

1. Создавался килоамперный ленточный электронный пучок с энергией 400–600 кэВ, плотностью тока 1.5–2 кА и угловой расходимостью около 0.1 рад.

2. Создавалась предварительная плазма с перестраиваемым профилем плотности $(2-4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

3. При релаксации пучка в магнитной ловушке с магнитным полем создавалась плазма с плотностью $(0.5-1) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

4. При релаксации электронного пучка в этой плазме была реализована генерация СВЧ колебаний.

5. За счет неоднородности плазмы, флуктуаций в ней электромагнитного поля происходил выход энергии колебаний плазмы преимущественно вдоль оси магнитного поля в виде электромагнитного излучения.

Автором осуществлялся контроль хода каждого из перечисленных процессов за счет средств диагностики. В целом диссертация является законченным научным исследованием, вносящим заметный вклад в данный

раздел современной физики. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

Представленные в диссертации результаты будут востребованы в дальнейших научных исследованиях. Она может быть интересна для научных и образовательных учреждений, в которых ведутся исследования по соответствующей тематике. К их числу относятся Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФИАН, ИОФ РАН.

Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям

Диссертация Самцова Дениса Алексеевича «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей существенное значение для развития физики плазмы. Содержание диссертационной работы Самцова Д.А. соответствует паспорту научной специальности 1.3.9. Физика плазмы. Существенных замечаний к диссертационной работе нет. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, обладает научной новизной и практической ценностью. В своей диссертационной работе автор продемонстрировал высокий уровень владения методами экспериментального исследования плазмы.

На основании вышеприведенного можно заключить, что диссертация Самцова Д.А. «Исследование генерации потока терагерцового излучения мультимегаваттного уровня мощности при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Самцов Денис Алексеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Отзыв составил: секретарь научного семинара «ФИЗИКА ПЛАЗМЫ»

Д.ф.-м.н., доцент
кафедры физической
электроники физического
факультета МГУ имени
М.В.Ломоносова



Двинин Сергей
Александрович

Дата: 01.11.2023

Тел.: +7 (495) 939-17-87
E-mail: DvininSA@my.msu.ru

Отзыв на диссертацию заслушан и утверждён на заседании кафедры физической электроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (протокол № 43 от 16 октября 2023 г.).

Зав. кафедрой
физической электроники
физического факультета
МГУ имени
М.В.Ломоносова,
д.ф.-м.н.,
профессор



Черныш Владимир
Савельевич
01.11.2023

Секретарь научного
семинара «Физика
плазмы»
Д.ф.-м.н., доцент
кафедры физической
электроники
физического факультета
МГУ имени
М.В.Ломоносова.



Двинин Сергей
Александрович.
01.11.2023

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Адрес: 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Телефон: +7 (495) 939-10-00 Факс: +7 (495) 939-01-26. WWW: www.msu.ru, E-mail: info@rector.msu.ru
Кафедра физической электроники
Телефон: +7 (495) 939-17-87
e-mail: DvininSA@my.msu.ru

доп. [Л.А. Фара] /