

На правах рукописи



Самцов Денис Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПОТОКА
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МУЛЬТИМЕГАВАТТНОГО
УРОВНЯ МОЩНОСТИ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП
В ЗАМАГНИЧЕННОМ ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ**

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, профессор
Аржанников Андрей Васильевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Пегель Игорь Валериевич – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Савилов Андрей Владимирович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», заведующий лабораторией

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

Защита диссертации состоится «05» декабря 2023 года в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://www.inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «25» октября 2023 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук, профессор РАН



Лотов Константин Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одной из актуальных задач современной физики является освоение терагерцового (ТГц) диапазона, который расположен в интервале частот 0.1–10 ТГц (длины волн 3–0.3 мм) в спектре электромагнитного (ЭМ) излучения. Трудности освоения ТГц диапазона связаны с тем, что он лежит между инфракрасным (ИК) и микроволновым (сверхвысокочастотным, СВЧ) диапазонами, а перенос применяемых там методов генерации и преобразования потоков излучения встречает значительные препятствия. В то же время освоение ТГц диапазона крайне необходимо из-за открывающихся возможностей использования этого излучения в обширной сфере возможных приложений, что связано с его характерными особенностями. Терагерцовое излучение не оказывает вредного воздействия на объекты живой природы, обладает способностью проникать глубоко в вещества и диэлектрические материалы, непрозрачные в оптическом и инфракрасном диапазонах, может возбуждать колебательные моды супрамолекулярных структур и кристаллических решёток твёрдого тела, а также вращательные уровни сложных молекул.

В течение двух последних десятилетий был достигнут значительный прогресс в освоении методов генерации мощных потоков ТГц излучения. Отметим лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) ТГц диапазона, которые успешно применяются для генерации ТГц излучения в импульсно-периодическом режиме. Лидером по достижению высокой пиковой и средней мощности в спектральной области выше 1 ТГц является Новосибирский ЛСЭ (Ново-ЛСЭ), созданный в ИЯФ СО РАН. Этот источник генерирует импульсы излучения в диапазоне 1.2–2.5 ТГц (0.3–0.1 мм) с пиковой мощностью до 1 МВт при длительности 30–100 пс и скважностью около 180 нс. Для генерации мощных потоков излучения в частотном интервале 0.1–0.7 ТГц в настоящее время используются вакуумные устройства (гиротроны), работающие на принципах вакуумной электроники. Мощность излучения на выходе гиротронов достигает уровня одного мегаватта на частоте 0.2 ТГц и падает до уровня 0.2 МВт уже на частоте ≈ 0.7 ТГц. Причём распространение этого подхода для генерации мегаваттных потоков на более высоких частотах сопряжено с большими трудностями. В этих обстоятельствах, исследования, направленные на создание мегаваттных источников излучения в области частот 0.1–1.0 ТГц, несомненно актуальны и в настоящее время.

Одним из перспективных направлений в решении указанной проблемы мы считаем использование метода генерации излучения на основе механизма коллективного торможения релятивистского электронного пучка (РЭП) в замагниченной плазме. Гигаваттный уровень мощности таких пучков позволяет получать на выходе генераторов поток ТГц излучения с мощностью масштаба

десятков и даже сотен МВт. Кроме того, использование этого физического механизма в пучково-плазменной системе открывает уникальную возможность быстрой перестройки частоты генерируемого излучения путём варьирования плотности плазмы.

Исходя из вышеизложенного можно утверждать, что выбранная тема диссертационной работы, нацеленная на определение перспективы создания генераторов ТГц излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия, представляется безусловно актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Экспериментальные исследования взаимодействия релятивистских электронных пучков с плазмой в лабораторных условиях были начаты во второй половине прошлого столетия. С одной стороны, такие исследования были направлены на поиск механизмов нагрева плазмы применительно к решению термоядерной проблемы. С другой стороны, они способствовали раскрытию механизмов генерации всплесков излучения в солнечной короне и других объектах космического пространства. Как было выяснено в ходе этих исследований, прохождение сильноточного пучка релятивистских электронов по замагниченному плазменному столбу приводит к раскачке собственных электронных колебаний плазмы за счёт развития пучковой (двухпоточковой) неустойчивости. Эти близкие к потенциальным колебания (ленгмюровские волны) могут достигать высокого уровня плотности энергии и, при определённых условиях, передавать свою энергию частицам плазмы, или трансформироваться в ЭМ волны. Теоретические исследования механизмов трансформации волн продолжаются, и в последние годы они сосредоточены на интерпретации экспериментальных исследований по инжекции в замагниченный плазменный столб РЭП с килоамперным током, в которых достигается высокий уровень плотности энергии плазменных колебаний.

На начальном этапе экспериментальные исследования накачки интенсивных электронных колебаний в замагниченной плазме при инжекции РЭП проводились при длительности импульса инжектируемого пучка масштаба 100 нс (установки ИНАР и ГОЛ-1). В дальнейшем, эти исследования были продолжены на установке ГОЛ-3 с использованием пучков микросекундной длительности. Основная задача этих исследований состояла в накачке сильноточным РЭП плазменных колебаний, которые при затухании нагревают плазменные электроны, и в последующих процессах – ионы. В последнее десятилетие фокус исследований сместился на изучение процессов генерации ЭМ излучения на плазменной частоте. Первая серия опытов данной направленности проведена на установке ГОЛ-3. В дальнейшем эти исследования были продолжены на созданной специализированной установке ГОЛ-ПЭТ. Результаты цикла исследований, проведённых на этой установке за последние пять лет, были положены в основу представляемой диссертационной работы.

Цели и задачи

Главной целью диссертации являлось достижение максимальной мощности направленного потока ТГц излучения, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы, и установление закономерностей в изменениях его спектра в зависимости от параметров пучково-плазменной системы.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1) Создать систему приготовления столба предварительной плазмы, которая обеспечивает возможность получения различных вариантов распределения её плотности как по сечению, так и по длине столба.

2) На основе имеющихся методик измерений параметров сильноточных РЭП создать комплекс диагностик для измерения функции распределения пучковых электронов по питч-углам и по энергиям.

3) Адаптировать радиометрический диагностический комплекс для регистрации спектральных характеристик потока генерируемого излучения в условиях проводимой серии экспериментов.

4) Создать компьютерную систему сбора и обработки экспериментальных данных, а также последующего их анализа применительно к сопоставлению результатов экспериментов с теоретическими моделями.

5) Осуществить измерения угловых характеристик электронов инжектируемого пучка и их функции распределения по энергиям после взаимодействия пучка с плазмой.

6) Провести измерения макроскопических характеристик и спектрального состава потока ТГц излучения, генерируемого в пучково-плазменной системе в условиях варьирования параметров плазмы, инжектируемого пучка и ведущего магнитного поля.

7) Провести сопоставление результатов экспериментальных исследований с имеющимися моделями теоретического описания процесса генерации излучения при пучково-плазменном взаимодействии.

Научная новизна работы

Впервые экспериментально установлены закономерности влияния на мощность и спектральный состав потока ТГц излучения, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы, со стороны распределения плотности по радиусу замагниченного плазменного столба и спада плотности плазмы на его торце. Достигнуты рекордно высокие величины мощности (8 ± 2 МВт) и энергосодержания (5–7 Дж) в потоке ТГц излучения при микросекундной длительности импульса. Впервые измерено распределение замагниченных релятивистских электронов с энергией 0.5 МэВ по питч-углу для десяти-килоамперного пучка после преобразования его сечения из ленточного в круглое, применительно к его инжекции в плазменный столб.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что в ходе проводимых исследований были установлены закономерности генерации электромагнитного излучения в замагниченном плазменном столбе на верхнегибридной плазменной частоте и её удвоенной величине при коллективном торможении в нём РЭП микросекундной длительности с килоамперным током. Это послужит основой для проверки адекватности теоретических моделей, развитых в последнем десятилетии по генерации излучения в пучково-плазменной системе.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что экспериментально измерены характеристики продольного потока ТГц излучения, генерируемого в пучково-плазменной системе, представляющие интерес для ряда практических приложений. Полученный в пучково-плазменной системе направленный поток ТГц излучения микросекундной длительности с угловой расходимостью $5-7^\circ$ и рекордным уровнем мощности 8 ± 2 МВт в области частот $0.1-0.3$ ТГц применим для воздействия на объекты и материалы.

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы являются экспериментальные методы исследования генерации ЭМ излучения, возникающего при релаксации РЭП в замагниченном плазменном столбе. Для определения зависимостей процессов взаимодействия РЭП с плазмой, приводящих к формированию потоков ТГц излучения, проведены измерения параметров плазмы, пучка и излучения. Для измерения углового распределения скорости электронов в релятивистском пучке использован контактный датчик. Измерение локальных параметров плазмы осуществлено системой Томсоновского рассеяния, которое дополнено интерферометрией на квазистационарном лазерном луче. Для измерения спектрального состава генерируемого излучения в области частот менее 0.5 ТГц использована система из частотно-селективных датчиков на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ). Для измерения полной мощности в потоке излучения применён калориметр. Для обработки результатов измерений и анализа характерных зависимостей создан комплекс компьютерных программ, обеспечивающих сбор и первичную обработку данных с последующим представлением спектральных характеристик излучения в корреляции с параметрами пучка и плазмы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. При релаксации РЭП с плотностью тока $1.5-2$ кА/см², энергией электронов $0.4-0.6$ МэВ и угловой расходимостью 0.1 ± 0.02 рад в замагниченном

плазменном столбе с плотностью $0.4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и выше пучково-плазменная система генерирует потоки излучения в спектральной области 0.1–0.6 ТГц с энергосодержанием 5–7 Дж при длительности импульса на полувывоте 0.5–0.8 нс и, соответственно, с рекордным уровнем мощности $8 \pm 2 \text{ МВт}$, что было показано в экспериментах на ГОЛ-ПЭГ.

2. Переход от однородного распределения плотности плазмы к распределению с модулированной по радиусу приводит к 30-кратному росту спектральной плотности мощности в потоке излучения на частоте верхне-гибридных плазменных колебаний, которая лежит в интервале 0.2–0.3 ТГц.

3. Конфигурация плазменного столба с резким понижением плотности на его торце, обращённом к коллектору, поглощающему электроны прошедшего через плазму пучка, обеспечивает эффективный вывод потока излучения в вакуум и далее из вакуума в атмосферу. Выводимый таким образом поток излучения обладает угловой расходимостью 5–7° и может распространяться на расстояние нескольких метров, сохраняя мощность на уровне нескольких мегаватт.

4. Разработана методика решения обратной задачи для восстановления функции распределения электронов по углам и энергии в ходе компьютерной обработки экспериментальных данных, в которой используются только базовые представления о виде функции, а не накладываются строгие ограничения на её характер поведения.

5. Использование взрыво-эмиссионного катода в ленточном диоде с магнитной изоляцией позволяет получать в ходе трансформации и сжатия сечения пучка в ведущем магнитном поле плотность тока МэВ-ных электронов 1–2 кА/см² при их среднеквадратичном угловом разбросе 4–6°, что достоверно установлено в результате большого числа экспериментов.

6. Использование модифицированной системы высоковольтного разряда обеспечивает формирование замагниченного плазменного столба с возможностью задания различных профилей распределения плотности, подходящих для эффективной генерации направленных потоков ТГц излучения при пучково-плазменном взаимодействии.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов достигается хорошо обоснованным выбором физических и технических параметров, а также геометрии проводимых экспериментов, калибровкой используемых датчиков, высокоэффективной системой сбора и обработки данных, полученных при многократном проведении экспериментов. Приведённые выводы сформулированы на основе большого массива экспериментальных данных. Основные закономерности подтверждаются теоретическим описанием процессов генерации.

Исследования поддержаны грантом Российского научного фонда (Договор № 19-12-00250, 2019–2021 гг.) и персональным грантом Российского фонда фундаментальных исследований (Договор № 20-32-90045, 2020–2022 гг.).

Основные результаты диссертационного исследования получены в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук в 2018–2022 годах. По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 4 в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и 3 – в сборниках тезисов докладов научных конференций.

Личный вклад

Участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Автор диссертации принимал активное участие в формулировании требующих решения задач, проведении необходимых экспериментов, анализе полученных результатов, подготовке публикаций и представлении результатов на международных конференциях. Подготовка к публикации полученных результатов работы проводилась совместно с соавторами. Список публикаций, рекомендованных ВАК, содержит 4 работы. Авторский вклад соискателя в статье 1 заключается в построении численной модели для расчёта прохождения электронов через вещество в коллекторах датчика углового разброса. Результаты численного моделирования, проведённого автором, использовались для восстановления углового распределения электронов в пучке. Авторский вклад соискателя в статьях 2 и 4 заключается в измерении спектральной плотности мощности ТГц излучения, обработке полученных результатов, а также анализе зависимости спектральной плотности мощности от различных параметров эксперимента, в частности, от плотности плазмы. В статье 3, посвящённой генерации столба предварительной плазмы, соискателем сформулировано и реализовано в экспериментах предложение по использованию управляемого напуска нейтрального газа для варьирования продольного профиля плотности плазмы с целью обеспечения оптимальных условий формирования продольных потоков ТГц излучения. Значительная доля экспериментов, результаты которых описаны в статье 4, выполнена под руководством соискателя. В результате работы автора диссертации были определены параметры пучково-плазменной системы, обеспечивающие генерацию импульса излучения мультимегаваттного уровня мощности.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх разделов и заключения. Полный объём диссертации составляет 129 страницы с 50 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 86 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, а также представлены выносимые на защиту положения.

В первом разделе приведено описание экспериментальной установки ГОЛ-ПЭТ, созданной для проведения исследований взаимодействия РЭП с замагниченной плазмой, которое приводит к генерации направленного потока ЭМ излучения на частоте электронных плазменных колебаний. Описан диагностический комплекс. Подробно рассмотрены подходы к измерению параметров ТГц излучения, а также датчик и методика обработки данных для восстановления распределения электронов РЭП по питч-углу.

Установка состоит из ускорителя У-2, генерирующего пучок МэВ-ных электронов с током до 20 кА, и многопробочной открытой магнитной ловушки, в которой удерживается столб плазмы. Схема плазменной части установки приведена на рисунке 1. Средняя величина магнитного поля в катод-анодном зазоре ускорительного диода У-2 составляет 0.3 Тл. На входе плазменного столба создаётся магнитная пробка, индукция поля в которой достигает 6 Тл. Период магнитных пробок в соленоиде 22 см при пробочном отношении $V_{\max}/V_{\min}=4.5/3.2$. Для создания плазмы осуществляется напуск газа в вакуумный объём установки, который ионизируется путём управляемой инициации пробоя системой высоковольтного (В/В) разряда. В момент времени, соответствующий максимуму плотности предварительной плазмы, начинается инжекция РЭП. Электронный пучок генерируется в магнитно-изолированном ленточном диоде с катодом, изготовленном из углеродного микроволокна. Перед инжекцией в плазму осуществляется трансформация в ведущем магнитном поле сечения пучка в круглое и сжатие до диаметра 4 см. Инжектируемый РЭП обладает энергией 0.5 МВ, током 10 кА, длительностью импульса около 5 нс. Взаимодействие РЭП с плазмой приводит к генерации потоков ЭМ излучения ТГц диапазона частот. Генерируемое излучение, распространяющееся вдоль оси плазменного столба, отделяется от электронов пучка в выходном расширителе сечения потока ведущего магнитного поля и через квазиоптический волноводный тракт выводится в атмосферу.

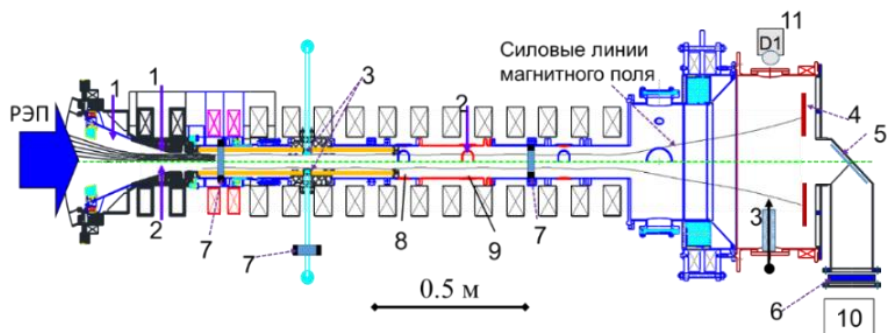


Рисунок 1 — Схема плазменной секции установки ГОЛ-ПЭТ. 1 — криптоновые импульсные клапаны; 2 — водородные импульсные клапаны; 3 — основные и дополнительный разрядные электроды; 4 — приёмник РЭП; 5 — поворотное зеркало; 6 — окно вывода излучения; 7 — пояса Роговского; 8 — положение системы Томсоновского рассеяния; 9 — положение интерферометра Майкельсона; 10 — комплекс диагностик ТГц излучения; 11 — одиночный датчик ТГц излучения

Диагностический комплекс установки включает системы регистрации параметров пучка, плазмы, ТГц излучения, а также характеристик электрических цепей. Ток пучка в диоде, системе сжатия пучка, а также в нескольких сечениях плазменного столба измеряется импульсными трансформаторами тока (7). Зависимость среднего по диаметру значения плотности плазмы от времени измеряется при помощи интерферометра Майкельсона (9) на длине волны излучения $\lambda = 10.6$ мкм. Диагностика имеет разрешение на уровне $3 \cdot 10^{14}$ см⁻², временное разрешение 40 нс, набег фазы $2 \cdot \pi$ соответствует линейной плотности плазмы $\langle n \cdot l \rangle = 2 \cdot 10^{16}$ см⁻². Распределение плотности плазмы по радиусу измеряется системой Томсоновского рассеяния (8) излучения с длиной волны $\lambda = 1.053$ мкм, генерируемого неодимовым (Nd) лазером. Диаметр лазерного луча в плазменном столбе - 2 мм, длительность импульса - 60 нс, максимальная энергия в импульсе ~20 Дж. Протяжённость локальной области луча, из которой собирается рассеянное электронами плазмы излучение в отдельный канал регистрации, имеет величину 6 мм.

Для регистрации спектральной плотности мощности в интервале частот 0.1–0.5 ТГц используется 8-канальный полихроматор, созданный на основе диодов с барьером Шоттки. Частотная селективность каналов обеспечивается набором полосовых фильтров, а приемлемый уровень мощности поступающего в диод излучения – набором специализированных поглощающих фильтров с дискретными значениями ослабления в диапазоне 10–20 Дб. Для повышения достоверности результатов спектральных измерений была проведена

абсолютная калибровка спектральной чувствительности каналов полихроматора. Измерение пространственного распределения плотности мощности в потоке на качественном уровне осуществляется при помощи панелей из газоразрядных ламп. Корреляция между поведением во времени локальных значений плотности мощности в сечении потока установлена регистрацией сигналов с 4-х детекторов, локализованных в пространственно разнесённых по его сечению точках. Для измерения энергосодержания в импульсе излучения использован специализированный калориметр, созданный в ИПФ РАН. Величина чувствительности калориметра на частоте 100 ГГц составляет 80 ± 10 мкВ/Дж.

Для измерения углового распределения электронов пучка с энергией 0.5 МэВ, при индукции магнитного поля 0.3–0.6 Тл с характерными значениями питч-углов вектора скорости менее 0.3 рад (17°), разработан многоколлекторный датчик и создана новая методика обработки экспериментальных данных, на основе алгоритма Танабы-Хуанга. Важное свойством датчика является набор функций чувствительности, которые описывают вероятность поглощения частицы с заданными параметрами в i -ом коллекторе. В диссертации рассмотрено три подхода к вычислению этих функций и сделан выбор в пользу программного пакета Geant4.

Во втором разделе изложены результаты экспериментов по созданию столба предварительной плазмы, в которую должен инжектироваться РЭП с током масштаба 10 кА. Описаны характерные особенности системы (В/В) разряда, продемонстрированы возможности работы данной системы с позиции формирования плазменной колонны с заданной величиной плотности и возможность варьирования профиля плотности в продольном и радиальном направлениях для проведения исследований по генерации ТГц излучения.

Проведена реконструкция системы создания предварительной плазмы на основе В/В разряда, в ходе которой определены конфигурация электродов и условия работы отдельных узлов системы, обеспечивающие формирование плазмы с требуемыми параметрами. При проведении экспериментов доказаны возможность формирования плазменного столба с плотностью $(2-4) \cdot 10^{14}$ см⁻³ и возможность управления продольным и поперечным профилем плотности путём выбора схемы подключения разрядных электродов. Дополнительно использована возможность варьирования напуска рабочего газа для формирования плазменной колонны, отделённой от приёмника пучка вакуумным промежуток (конфигурация с вакуумным зазором). Осциллограммы токов пучка и плазмы для исследованных продольных конфигураций плазмы приведены на рисунке 2. При длительностях напуска водорода $\tau=10$ мс и $\tau=3$ мс РЭП инжектировался в момент времени $t=20$ мкс. В случае $\tau=1.5$ мс РЭП инжектировался в момент времени $t=30$ мкс.

Как видно из графиков, при уменьшении длительности напуска менее 2 мс начинается резкий рост тока на выходе из плазменного столба (I_{end}), при

неизменном значении тока на входе плазменного столба (I_{ent}). Плотность предварительной плазмы уменьшается, и в области между торцом плазменной колонны и приёмником пучка формируется вакуумный промежуток. В условиях с таким вакуумным зазором, амплитуда индуцированного компенсационного тока оказывается ограничена предельным плазменным током и не обеспечивает токовой нейтрализации РЭП. С другой стороны, совпадение пиковых значений токов, регистрируемых на входе и выходе плазменного разряда, свидетельствует о сохранении зарядовой нейтрализация пучка.

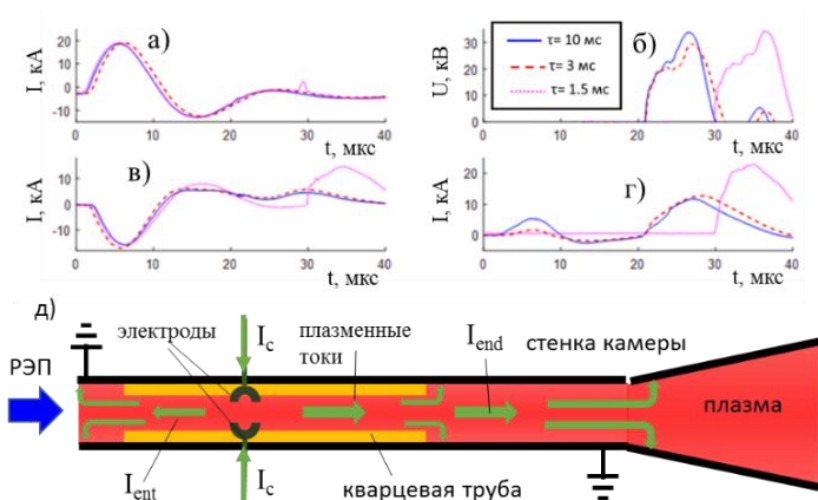


Рисунок 2 — Осциллограммы токов в различных режимах напуска газа при инжекции электронного пучка. (а) — I_c ; (б) — напряжение в диоде ускорителя; (в) — I_{ent} ; (г) — I_{end} ; (д) — схема измерения токов; τ — время клапана в открытом состоянии

В третьем разделе исследована зависимость углового разброса электронов инжектируемого пучка от времени в течение импульса его генерации в ускорительном диоде при различных значениях ведущего магнитного поля в диоде и степени нейтрализации РЭП в системе трансформации его сечения. На основе проведённых измерений проведены оценки длины релаксации РЭП в плазме.

В серии экспериментов измерены токи с коллекторов датчика и значения их среднеквадратичного отклонения. Значения этих токов использованы для восстановления функции распределения электронов пучка по питч-углу. Пример восстановленной функции распределения электронов по углу приведён на рисунке 3. Угловой разброс не зависит от давления в диапазоне значений

2–4 атм. Результаты среднего за время импульса углового разброса в диапазоне магнитных полей 0.13–0.22 Тл при давлении на клапанах 3.5 атм приведены в таблице 1.

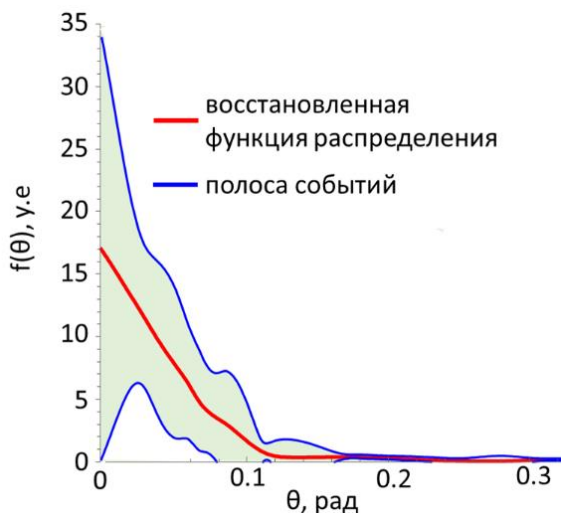


Рисунок 3 — Функция углового распределения электронов, восстановленная для момента времени 1.5 мкс, выстрела № 10599

Таблица 1 — Средний угловой разброс при различных значениях магнитного поля в диоде ускорителя

В, Тл	0.13	0.17	0.22
Средний угловой разброс, рад	0.1±0.02	0.093±0.01	0.067±0.008

В течение первых 3–4 мкс исследуемого интервала времени при всех значениях магнитных полей диода величина среднего углового разброса остается примерно равной ~0.08 рад. К концу импульса пучка значение питч-угла увеличивается, что можно объяснить перераспределением тока пучка по его сечению, в ходе которого возникает магнитное поле, вызванное током самого пучка в направлении перпендикулярном оси датчика. Увеличение магнитного поля в диоде приводит к существенному уменьшению углового разброса пучка и, следовательно, к росту плотности электронного пучка в фазовом пространстве. Для случая магнитного поля в диоде 0.22 Тл угловой разброс электронов

пучка имеет величину около $4-6^\circ$, что вполне приемлемо для пучково-плазменных экспериментов по генерации терагерцового излучения.

Четвёртый раздел посвящён исследованию процесса генерации потока ТГц излучения в пучково-плазменной системе, распространяющегося вдоль оси плазменного столба, а также измерению характеристик этого излучения. Исследованы характеристики этого потока излучения, генерируемого при релаксации РЭП с плотностью тока $(1-2)$ кА/см² в плазме с плотностью масштаба $n_e \approx 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Измерены ключевые характеристики этого потока в условиях, когда он выведен в атмосферу: спектральный состав, энергосодержание и распределение плотности мощности по сечению потока.

Изучены варианты генерации излучения в пучково-плазменной системе при несколько различающихся условиях эксперимента. Особо выделены эксперименты при трёх конфигурациях плазменного столба, которые оказались приемлемыми для вывода потока излучения вдоль оси системы: однородная по сечению столба плотность плазмы (1); наличие радиального градиента плотности (2); резкое понижение плотности на торце столба (3), где поток выходит из плазмы в вакуум. Для случая (1) удалось реализовать условия эксперимента, обеспечивающие однородное радиального распределение плотности плазмы, что представляет интерес с позиции возможности сопоставления с результатами теоретического анализа. Результаты измерения радиального распределения плотности плазмы в этой серии экспериментов и спектральный состав излучения для данного случая приведены на рисунке 4.

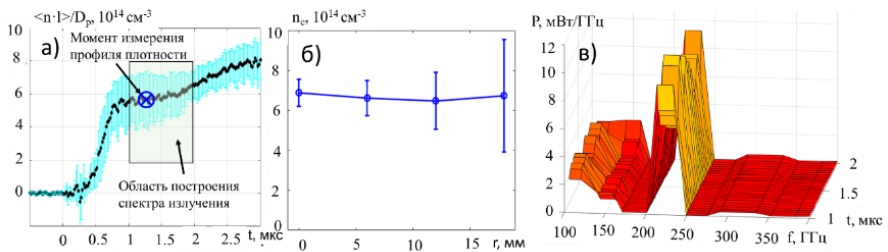


Рисунок 4 — Средняя по диаметру плотность плазмы (а); распределение плотности плазмы по радиусу (б); спектральный состав излучения (в); представленные результаты получены усреднением по набору из 9 выстрелов при одинаковых условиях эксперимента

Для приведённых параметров эксперимента частота электрон-циклотронных колебаний ($f_c = 112$ ГГц) оказывается сравнима с частотой ленгмюровских колебаний ($f_p = 220$ ГГц). В этом случае необходимо учитывать вклад магнитного поля в уравнение дисперсии плазменных колебаний. Эти плазменные колебания лежат на ветви верхне-гибридных плазменных волн, область которых

простирается от ленгмюровской (плазменной) частоты f_p до верхне-гибридной ($f_{uh}=245$ ГГц).

В двух других случаях реализовывался режим сильной турбулентности. В таких условиях процесс генерации может реализовываться в нерегулярном режиме, который сопровождается флуктуациями мощности и спектрального состава генерируемого излучения. По этой причине, среди выстрелов производился отбор и сопоставление выстрелов с высокой плотностью мощности. Было замечено, что существует корреляция между средней по сечению величиной поперечного градиента плотности и уровнем мощности в продольном потоке излучения. На рисунке 5 приведены поперечные профили плотности, которые получены путём усреднения по набору однотипных профилей, измеренных системой Томсоновского рассеяния. В первом варианте профиль плотности характеризуется более высоким средним значением и малыми градиентами $\frac{\partial n_e}{\partial x} \leq 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-4}$ (случай однородной плазмы). Во втором варианте профиль плотности характеризуется более низким средним значением и высокими градиентами $\frac{\partial n_e}{\partial x} \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-4}$ (случай градиентной плазмы). Осциллограммы сигналов спектральной плотности мощности для двух вариантов плотности приведены на рисунке 6.

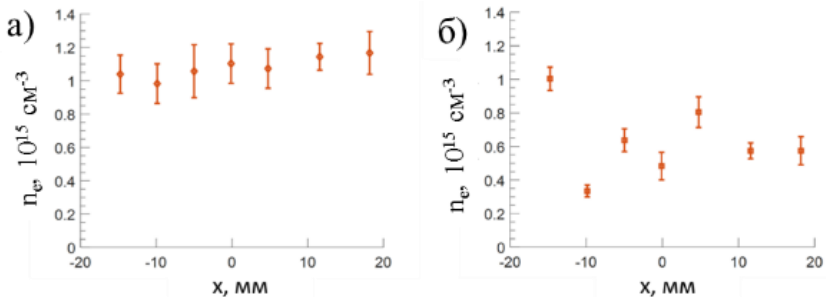


Рисунок 5 — Характерные распределения плотности плазмы: случай однородной плазмы (а); случай градиентной плазмы (б)

Переход от конфигурации с однородной плазмой к конфигурации с радиальными градиентами плотности приводит к 30-кратному увеличению спектральной плотности мощности в потоке излучения на частотах 0.2–0.3 ТГц. Удельное значение мощности излучения в спектральном интервале 150–300 ГГц достигает $25 \pm 4 \text{ кВт} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Средняя мощность этого излучения оценивается в 4 ± 1 МВт.

Представленному результату экспериментов имеется следующее объяснение. Квазипериодическое возмущение плотности плазмы в продольном и поперечном направлениях, которое формируется во время инъекции сильно-

точного РЭП, приводит к такой трансформации характера дисперсии электронных плазменных волн, при которой линия резонансного взаимодействия пучка, смещённая с учётом релятивизма электронов на доплеровский сдвиг, пересекается с медленной ветвью ЭМ плазменных волн. В этих условиях появляется возможность возбуждения и накачки релятивистским пучком непосредственно ЭМ волны, что обеспечивает высокую плотность мощности в генерируемом потоке излучения.

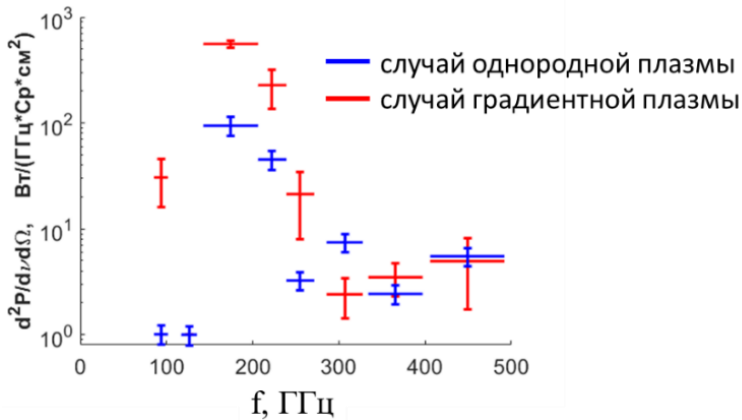


Рисунок 6 — Средние значения спектральной плотности мощности в максимуме сигналов излучения

В ходе исследования генерации излучения в плазменном столбе с различным уровнем поперечных градиентов плотности был отработан сценарий проведения эксперимента, обеспечивающий создание предварительной плазмы с устойчивым формированием градиентов плотности. Дополнительно в данном сценарии была реализована конфигурация, в которой торец столба предварительной плазмы был отделён от коллектора вакуумным зазором. Резкое понижение плотности на торце плазменного столба не оказывает прямого влияния на генерацию излучения в плазменном столбе, но создаёт условия для эффективного вывода потока излучения из плазмы в вакуум, что обеспечивает подъём мощности в потоке, выведенном через разделительное окно в атмосферу. Достигнутая в этих условиях напряжённость электрического поля в выведенном потоке излучения оказалась настолько высокой, что обеспечила горение ВЧ разряда в стеклянных колбочках неоновых газоразрядных ламп.

С использованием неоновых панелей было зарегистрировано пространственное распределение мощности в сечении потока излучения на различном расстоянии от выходного окна установки, когда он свободно распространяется

в атмосфере. Схема расположения панели и фотографии её свечения на различном удалении от выходного окна представлены на рисунке 7. Как видно из рисунка, основная доля мощности локализована в центральной части потока, в круге диаметром около 20 см. Причём данная структура свечения панели и, соответственно, распределение мощности в потоке сохраняются на расстоянии до 3 м. На расстоянии более 3 м от выходного окна исчезает ярко выделенная область свечения панели, но по-прежнему наблюдается свечение отдельных ламп. По результатам измерения сечения потока излучения при его распространении в атмосфере была выполнена оценка угловой расходимости потока, величина которой составляет примерно $5-7^\circ$.

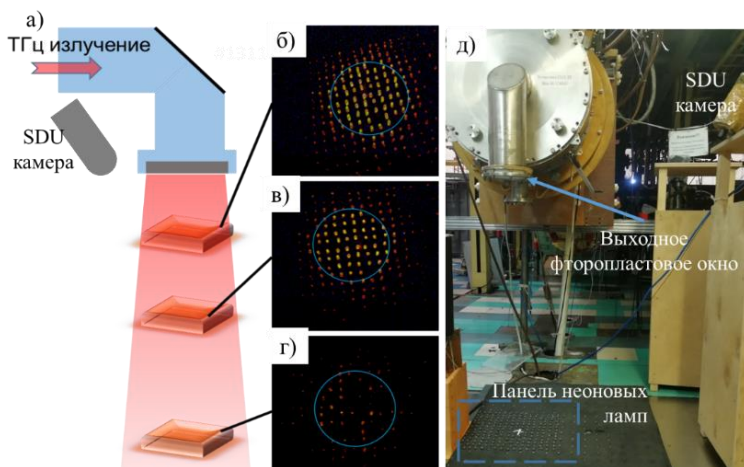


Рисунок 7 — Распределение плотности мощности ТГц излучения по сечению потока, распространяющегося в атмосфере на разном расстоянии от выходного окна: схема эксперимента (а); фото панели на расстояниях 46 см (б), 108 см (в), 320 см (г); фото установки (д)

Полученные результаты свидетельствуют о высокой плотности мощности и малой угловой расходимости потока. В этих условиях, для двух вариантов распространения потока излучения в атмосфере, проведены измерения энергосодержания. Результаты представлены на рисунке 8. В первом варианте поток распространялся беспрепятственно расширяясь. Во втором — при помощи металлической трубы формировался направленный поток излучения.

Энергосодержание потока излучения, регистрируемого калориметром, в этих случаях составляет 1 ± 0.2 и 2.4 ± 0.2 Дж. Установка трубы приводит к значительному увеличению энергосодержания в потоке излучения, захватываемом калориметром. Нормировка на полное сечение потока даёт 9 ± 2 и 6 ± 0.5 Дж соответственно.

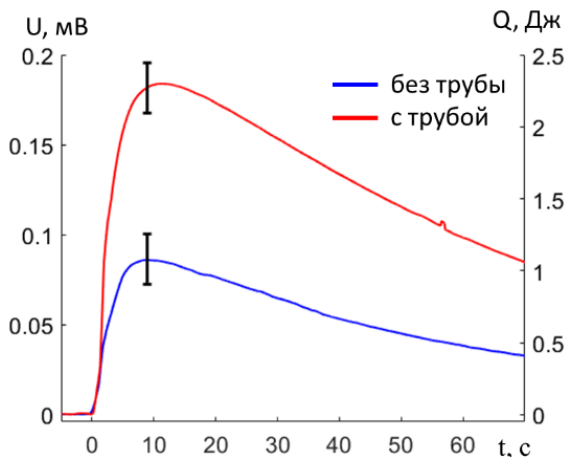


Рисунок 8 — Осциллограммы сигналов в эксперименте по измерению энерго-содержания в потоке излучения

В рамках экспериментальных исследований удалось обеспечить условия формирования и вывода в атмосферу потока ТГц излучения. За счёт оптимизации распределения плотности плазмы по диаметру и длине плазменного столба достигнуты рекордные значения мощности. Энергосодержание в потоке, выведенном в атмосферу, имеет величину около 5–7 Дж, что при длительности импульса 0.5–0.8 мкс соответствует мощности 8 ± 2 МВт.

Необходимо отметить, что при достигнутых высоких параметрах мощности в потоке излучения эффективность передачи энергии от РЭП в излучение не превышает 0.1%. Возможными подходами к увеличению эффективности генерации являются: создание плазмы со сложным неоднородным пространственным распределением плотности, использование дополнительных физических механизмов, например, генерация на встречных электронных пучках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах, описанных в данной диссертационной работе, исследованы закономерности эмиссии потоков излучения в диапазоне частот 0.1–0.6 ТГц вдоль оси замагниченного плазменного столба при релаксации в нём сильноточного РЭП. В многочисленных сериях проведённых экспериментов определены условия, обеспечивающие формирование и вывод из плазмы в атмосферу потоков ТГц излучения с уровнем мощности масштаба 10 МВт. Измерены параметры РЭП, при которых достигается высокий уровень пучково-плазменного взаимодействия. Изучено несколько конфигураций столба пред-

варительной плазмы с различными профилями плотности применительно к генерации мощного потока ТГц излучения. Измерены характеристики потока ТГц излучения, выходящего вдоль оси пучково-плазменной системы.

В экспериментах по созданию столба предварительной плазмы с перестраиваемым профилем плотности получены следующие результаты:

1. На основе использования созданной модифицированной системы высоковольтного разряда с импульсным напуском газа удалось достигнуть устойчивого формирования различных профилей распределения плотности по сечению плазменного столба, в частности, подходящих для эффективной генерации ТГц излучения при пучково-плазменном взаимодействии.

2. Формированием плазменного столба с торцом, имеющим резкое снижение плотности плазмы в сторону вывода пучка электронов и потока генерируемого излучения, достигнуто 3-кратное повышение эффективности вывода, генерируемого в нём ТГц излучения в вакуум, и далее из вакуума в атмосферу.

В рамках задачи по измерению основных параметров РЭП до инжекции в плазму и после её прохождения получены следующие результаты:

1. Использование многоколлекторного датчика и специализированной методики обработки экспериментальных данных позволило осуществить измерения функции распределения скорости пучковых электронов по питч-углам перед инжекцией РЭП в плазменный столб. Измеренная величина среднеквадратичного углового разброса пучковых электронов составила $4-6^\circ$ при плотности тока пучка $1-2 \text{ кА/см}^2$, что представляется приемлемым для развития пучковой неустойчивости в плазме с плотностью $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

2. Разработано конструкторское решение для размещения и использования датчиков углового и энергетического распределения РЭП пучка на выходе его из плазменного столба. Проведены расчёты необходимой геометрии ведущего магнитного поля, а также моделирование для определения селективной чувствительности датчиков, которая используется при восстановлении функции распределения электронов по энергии и питч-углу.

По задаче исследования характеристик генерируемых потоков ТГц излучения достигнуты следующие результаты:

1. В условиях однородного распределения плотности плазмы по сечению плазменного столба спектр генерируемого в экспериментах излучения в потоке, выходящем вдоль его оси пучково-плазменной системы, лежит в области верхне-гибридных плазменных колебаний. Зарегистрированная ширина спектра этого излучения практически совпадает со спектральной шириной, которая следует из теоретического рассмотрения, проведённого в рамках модели пучково-плазменного взаимодействия в условиях развития модуляционной неустойчивости в интенсивных колебаниях, накачиваемых РЭП.

2. В случае периодической модуляции плотности плазмы по диаметру плазменного столба достигнуто 30-кратное увеличение спектральной плотности мощности генерируемого пучково-плазменной системой излучения на частотах 0.2–0.3 ТГц по отношению к случаю однородного по сечению столба. Такой рост спектральной плотности мощности получил объяснение в рамках теоретической модели, в которой авторами рассмотрена накачка непосредственно пучком релятивистских электронов электромагнитной ветви плазменных колебаний в случае квазипериодического возмущения плотности.

3. Калориметрические измерения энергосодержания в потоке излучения, выведенном в атмосферу при указанных выше условиях эксперимента, показали, что при длительности импульса на полувысоте 0.5–0.8 мкс его энергосодержание имеет величину 5–7 Дж. Это означает, что импульсная мощность в потоке излучения для указанной спектральной области 0.2–0.3 ТГц достигла рекордного уровня 8 ± 2 МВт.

4. Проведена регистрация пространственного распределения плотности мощности по сечению потока излучения, распространяющегося в атмосфере. Установлено, что, при распространении потока от выходного, его диаметр увеличивается с 20 до 35 см при изменении расстояния от окна, соответственно, с 45 до 320 см. Оценка угловой расходимости излучения на основе опытов по фокусировке излучения имеет величину 5–7°.

С позиции получения фундаментальных знаний, полученные результаты представляют интерес для разработки метода генерации мощных потоков излучения терагерцового диапазона частот с использованием механизмов пучково-плазменного взаимодействия. В свою очередь, проведенные исследования дают основу для создания импульсных генераторов ТГц излучения мультимегаваттного уровня мощности, что имеет большое значение для расширения использования источников такого излучения в сфере практических применений. Отметим, что в описанных экспериментах уже достигнут рекордный уровень мощности в потоке излучения на частоте 0.1–0.3 ТГц. При проведении исследований экспериментально обнаружен новый механизм взаимодействия пучка с плазмой, при котором возможна накачка пучком непосредственно ЭМ ветви колебаний.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. New detector and data processing procedure to measure velocity angular distribution function of magnetized relativistic electrons / A. V. Arzhannikov, M. A. Makarov, D. A. Samtsov [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2019. — Vol. 942. — P. 162349. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.162349>. — Дата публикации: 10.07.2019.

2. Well-directed flux of megawatt sub-mm radiation generated by a relativistic electron beam in a magnetized plasma with strong density gradients / A. V. Arzhannikov, I. A. Ivanov, A. A. Kasatov [et al.]. — Текст : электронный // Plasma Physics and Controlled Fusion. — 2020. — Vol. 62, nr 4. — P. 045002. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6587/ab72e3>. — Дата публикации: 19.02.2020.

3. Creation of plasma column with different density gradients to generate terahertz radiation during beam-plasma interaction / A. V. Arzhannikov, I. A. Ivanov, P. V. Kalinin [et al.]. — Текст : электронный // Journal of Physics: Conference Series. — 2020. — Vol. 1647. — P. 012011. — URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1647/1/012011> (дата обращения: 02.05.2023).

4. Energy Content and Spectral Composition of a Submillimeter Radiation Flux Generated by a High-Current Electron Beam in a Plasma Column With Density Gradients / A. V. Arzhannikov, S. L. Sinitsky, S. S. Popov [et al.]. — Текст : электронный // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2022. — Vol. 50, nr 8. — P. 2348–2363. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9813494>. — Дата публикации: 01.07.2022.

В сборниках тезисов докладов научных конференций:

1. Создание плазменного столба с различными градиентами плотности для генерации ТГц излучения в пучково-плазменном взаимодействии / А. В. Аржанников, И. А. Иванов, П. В. Калинин [и др.]. — Текст : электронный // Тезисы докладов XLVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, Россия, 16–20 марта 2020 года). — Москва, 2020. — С. 201. — URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XLVII/Pt/ru/GK-Samtsov.docx> (дата обращения: 02.05.2023).

2. Generation of Directed Flux of Megawatt THz Radiation as Result of Strong REB-Plasma Interaction in Plasma Column / A. V. Arzhannikov, I. A. Ivanov, A. A. Kasatov [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Plasma Science (Singapore, 6–10 December 2020). — IEEE, 2020. — P. 568. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9717519> (дата обращения: 02.05.2023).

3. Eight-Channel Polychromator for Spectral Measurements in the Frequency Band of 0.1–0.6 THz / A. V. Arzhannikov, I. A. Ivanov, S. A. Kuznetsov [et al.]. — Текст : электронный // Proceedings of the 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (Souzga, the Altai Republic, Russia, 30 June – 4 July 2021). — IEEE, 2021. — P. 101–105. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9507604> (дата обращения: 02.05.2023).

Самцов Денис Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ПОТОКА
ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МУЛЬТИМЕГАВАТТНОГО
УРОВНЯ МОЩНОСТИ ПРИ РЕЛАКСАЦИИ РЭП
В ЗАМАГНИЧЕННОМ ПЛАЗМЕННОМ СТОЛБЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 25.09.2023.
Подписано в печать 26.09.2023.
Формат 60×90 1/16. Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 12

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11