

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Байдин Иван Сергеевич

Генерация высокочастотного радиоизлучения в начальной фазе
высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе

Специальность 1.3.2 –

«Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Огинов Александр Владимирович

Официальные оппоненты:

Андреев Степан Николаевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела радиофотоники НИЦ Телекоммуникаций МФТИ

Евгений Давидович Казаков, кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя отделения плазменных технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится « 14 » апреля 2025 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.03 на базе ФИАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте института www.lebedev.ru

Автореферат разослан « __ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.262.03
доктор физико-математических наук

Баранов Сергей Павлович

I. Общая характеристика работы

Работа посвящена изучению спектральных, пространственных и временных характеристик радиоизлучения, генерирующегося в процессе развития искрового разряда в лабораторных условиях в воздухе.

Актуальность темы исследования

Исследование процессов, наблюдаемых в атмосферном разряде и приводящих к генерации различных типов излучений (рентгеновское, СВЧ, нейтронное и др.), представляет большой интерес для фундаментальной и прикладной физики газового разряда. Особый интерес представляет генерация СВЧ излучения. Комплексное исследование этого явления позволит лучше понять процессы, протекающие на начальной стадии разряда, в первые наносекунды после подачи высокого напряжения на электроды. Разработка методов анализа этого излучения позволит создать, в частности, грозопеленгаторы нового типа, работающие в диапазоне от сотен МГц до десяти ГГц в отличие от современных образцов (10–60 кГц). Это позволит точнее определять области грозовой активности, что имеет важное значение, например, в безопасности авиасообщений.

Исследование генерации широкополосных радиоизлучений во время развития атмосферных разрядов в природе представляется достаточно сложной задачей. Грозовая активность проходит в течении лишь нескольких недель в году. При этом, для набора достаточной статистики, регистрирующую аппаратуру необходимо располагать максимально близко к грозовому фронту, который непрерывно движется. Отдельной проблемой можно выделить исследование радиоизлучения сантиметрового диапазона и короче, ввиду особенностей распространения этих волн в среде.

Тем не менее, можно предположить, что процессы в разряде, приводящие к генерации соответствующих излучений носят фундаментальный характер. В этом плане исследование формирования разрядов в малых воздушных промежутках в лабораторных условиях, сопровождающихся эмиссией СВЧ, может пролить свет на механизмы генерации других сопутствующих излучений.

Цель работы и задачи исследований

Целью настоящей работы является регистрация и изучение СВЧ излучений, наблюдаемых в начальной фазе сильноточного атмосферного искрового разряда. Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Разработать под нужды эксперимента сверхширокополосную антенну.
2. С помощью разработанной антенны поставить ряд экспериментов по регистрации сигналов СВЧ в различных условиях протекания искрового разряда.
3. Провести калибровку системы регистрации и с её помощью локализовать источник радиоизлучения во времени и в пространстве.
4. Получить и проанализировать спектры радиоизлучений, генерируемых на различных стадиях формирования искрового разряда.

Научная новизна работы

СВЧ излучение, испускаемое молнией, и в частности искровым разрядом хоть и наблюдалось ранее, но регистрировалось узкополосными антеннами и на временах порядка единиц микросекунд. Локализация

источника радиоизлучения в этом диапазоне частот и с такой точностью ранее не проводилась.

Научная и практическая значимость работы

Процессы, в ходе которых генерируется СВЧ излучение в искровом разряде, до конца ещё не изучены, и могут быть связаны с фундаментальными явлениями в физике газового разряда. Поэтому работы по исследованию этих процессов представляют интерес в первую очередь с точки зрения общего глобального понимания плазмообразования на начальной стадии разряда до пробоя разрядного промежутка и до протекания основного тока разряда. Регистрация и изучение источника радиоизлучения с помощью антенн является одним из ключевых методов, дополняющих комплексную диагностику в связке с другими методами регистрации излучений газового разряда.

Методы исследований.

При исследовании пространственных параметров радиоизлучения применялся метод параллельного многоканального детектирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработана линейно поляризованная сверхширокополосная антенна (типа Вивальди) с экспоненциальным раскрытием щели, регистрирующая радиоизлучение в диапазоне частот 1,6–9,7 ГГц при коэффициенте стоячей волны по напряжению 1–2 и максимальным абсолютным усилением 7–10 дБ. Разработанная антенна подходит для использования в лабораторных экспериментах по регистрации и изучению свойств радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе.
2. Разработана система радио-регистрации на основе четырех сверхширокополосных антенн для локализации источников СВЧ-

излучения во времени и в пространстве с точностью не хуже 100 пс и 12 см.

3. С использованием компактного генератора микроволнового излучения проведена калибровка системы радио-регистрации и достигнута сантиметровая точность локализации источников СВЧ-излучения в пространстве.

4. Эмиссия СВЧ-излучения (1-6 ГГц) наблюдается на предпробойной стадии развития разряда, когда первые встречные стримеры с анода контактируют с катодом. Эмиссия носит затухающий характер. Источники СВЧ-излучения локализованы вблизи поверхности катода или на расстоянии около 10-20 см от его поверхности.

Личный вклад автора

Результаты диссертации получены автором лично или при его непосредственном участии. Автором лично проведен расчет и моделирование сверхширокополосных антенн типа Вивальди и их модификаций, приведённых в данной работе. Все экспериментальные результаты, приведенные в данной работе, были получены либо лично самим автором, либо при его определяющем участии. Автором лично разработан компактный генератор микроволн для калибровки системы регистрации и локализации источника СВЧ излучения. Автором предложен метод восстановления местоположения источника вспышек СВЧ излучения при помощи четырёх сверхширокополосных антенн. Автором проведена локализация источника радиоизлучения, рассчитаны погрешности и представлена визуализация расположения источника в пространстве внутри разрядного промежутка.

В работе [3] (см. стр 19) Байдин И.С. и Родионов А.А. являются соавторами. Данная статья приведена в оборе литературы на странице 47 в

главе 3 диссертационной работы Родионова А.А., показывающей результаты исследований угловой анизотропии параметров жесткого рентгеновского излучения. Таким образом, результаты, описанные в статье [3] и используемые каждым из упомянутых авторов в своих диссертационных работах, не пересекаются, так как относятся к разным диапазонам электромагнитного излучения.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждена многократным их воспроизведением во многих экспериментах с использованием современного оборудования и современных методов статистической обработки результатов измерений.

Апробация работы и публикации

Основные результаты работы были представлены на 10 международных конференциях в 10 докладах, в которых автор принимал личное участие:

- XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, 2018
- 45-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2018 г.
- XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, Russia, 2019 г.
- 46-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2019 г.
- XXXV International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, Russia, 2020 г.

- XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2021 г.
- 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), г. Томск, 2–8 октября 2022 г.
- XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024), Elbrus, Russia, 2024 г.
- Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО 2021, БПИО 2022, БПИО 2023, г. Москва, Россия (2021, 2022, 2023 г.)
- X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2024» г. Москва, Россия, 2024 г.

Материалы диссертации опубликованы в 8 статьях, из которых 4 в Q1 журналах, ссылки на которые приведены на страницах 16-17:

- Журнал технической физики
- Краткие сообщения по физике (2 статьи)
- Письма в журнал технической физики
- Physical Review E (3 статьи)
- Journal of Applied Physics

Материалы диссертации опубликованы как глава в коллективной монографии:

Е.В. Паркевич, А.И. Хирьянова, Т.Ф. Хирьянов, И.С. Байдин, К.В. Шпаков, А.А. Родионов, Я.К. Болотов, В.А. Рябов, Ю.К. Куриленков, А.В. Огинов. «Радио-вспышки в МГц и ГГц диапазонах частот, обусловленные процессами формирования стримеров». Глава в коллективной монографии «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные

процессы импульсной электроники и оптоэлектронике» под ред. Г.А. Месяца. — Москва : РУСАЙНС, 2022. — 290 с., стр. 34-53. ISBN 978-5-466-02607-8

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и Заключения. Объём диссертации включает 92 стр., включая 39 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 50 наименований.

II. Основное содержание работы

Во введении рассматривается объект исследования, дана краткая характеристика работы, обоснована её актуальность и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе приведен обзор литературы по основным механизмам пробоя различных газовых промежутков: стримерному пробое и пробоем на убегающих электронах. Описаны результаты современных работ по исследованию физических механизмов пробоя длинных (от десятков сантиметров и более) атмосферных промежутков. Приведены результаты различных научных групп, посвященные изучению параметров и механизмов испускания радиоизлучения в атмосферных лабораторных разрядах при пробое длинных промежутков, а также связи этих параметров с электрофизическими характеристиками разряда.

Во второй главе предложен расчет, моделирование и разработка двух моделей сверхширокополосной антенны с расширяющейся щелью для применения в экспериментах по регистрации радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда. В первой половине второй главы описан изготовленный прототип антенны с рабочим диапазоном частот 1,66 – 9,36 ГГц с КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению) не превышающим 2,0. Приведены результаты

использования антенны-прототипа в лабораторных исследованиях. Получены спектры радиоизлучений различных стадий формирования искрового разряда.

Анализ полученного спектра радиоизлучения позволяет выделить различные стадии развития искрового разряда, а так же получить доказательства о том, что регистрируемое радиоизлучение имеет различные характеристики на разных стадиях развития разряда. Результаты в первом приближении согласуются с экспериментальными и аналитическими работами по исследованию грозových и лабораторных искровых разрядов.

Во второй половине второй главы представлена модернизированная версия сверхширокополосной антенны с расширяющейся щелью для применения в экспериментах по регистрации радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда. В отличие от прототипа в итоговом варианте практически на порядок снижены потери в материале антенны. Рабочий диапазон частот у изготовленной антенны составляет от 1,16 до более чем 10 ГГц с КСВН не превышающим 3,0, коэффициент усиления (КУ) выше 8 дБ на частотах выше 1,6 ГГц.

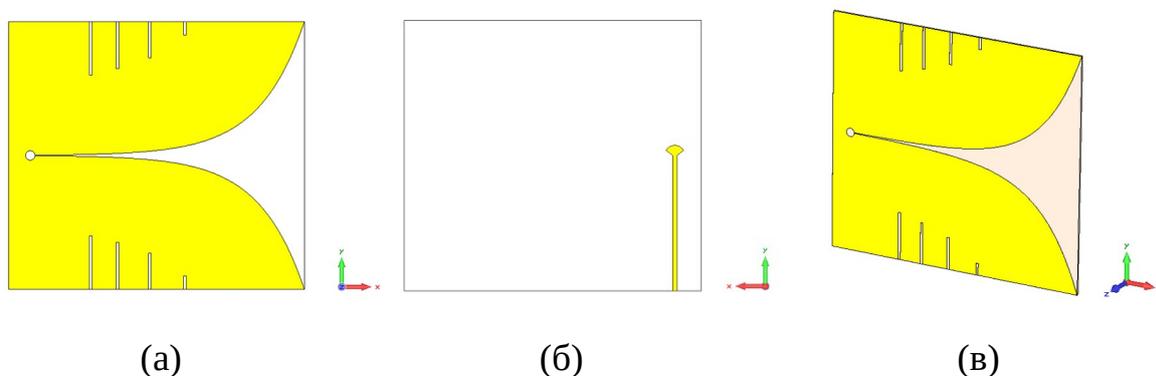


Рис. 1 Вид расчетной модели антенны: (а) – «лицевая» сторона с рабочей зоной и резонатором; (б) – «оборотная» сторона с микрополосковой линией (в) – изометрия

Таблица 1. Краткие характеристики разработанной антенны

Габариты	220×200×1,56 мм
Рабочий диапазон частот	1,6 – 9,7 ГГц
Поляризация	Линейная
КСВН в диапазоне рабочих частот	не более 2,0
Коэффициент усиления (КУ)	9 дБ с неравномерностью не более 1,5 дБ в конусе рабочих углов $\pm 30^\circ$
Рабочий диапазон температур	от минус 50°С до плюс 150°С

В третьей главе представлены результаты трех серий экспериментов, направленных на локализацию источника радиоизлучения сантиметрового диапазона, формирующегося в начальной фазе искрового разряда. Эксперименты выполнены на установке ЭРГ (рис. 2), представляющей собой реконструированный и модифицированный высокопоточный ускоритель для исследований высоковольтного атмосферного разряда, подробно описанный в первой части третьей главы.

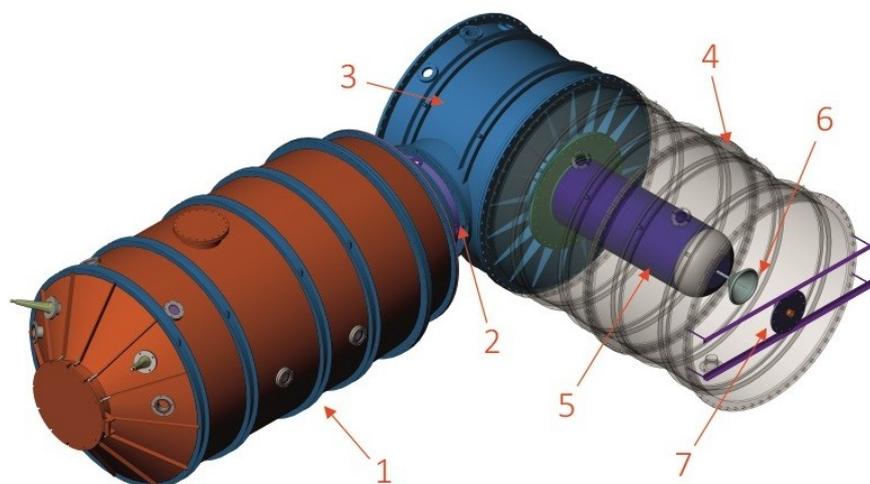


Рис. 2 Схема экспериментальной установки ЭРГ: 1 – маслонаполненный ГИН Аркадьева–Маркса, 2 – переходная секция, 3 – секция изолятора, 4 – обечайки воздушной секции (показаны прозрачными), 5 – проходной изолятор масло–воздух, 6 – катодная электродная система, 7 – анодная электродная система,

Источником напряжения является маслонеполненный генератор импульсных напряжений (ГИН) установки ЭРГ, собранной по схеме Аркадьева–Маркса. ГИН состоит из 15 пар конденсаторов ИК-100-0,4 с полной запасаемой энергией 60 кДж. Разряд развивался в воздухе при атмосферном давлении. К разрядному промежутку длиной 55 см прикладывался импульс напряжения с амплитудой 1,2 МВ, временем нарастания 200 нс и длительностью до 1 мкс. Максимальный ток разряда 10-15 кА. Используемая конфигурация электродов, расположенных аксиально-симметрично: полусферический сетчатый анод диаметром 90 мм, катод – в виде стального острия (игла), помещенного внутрь дюралевого конуса имеющего плоскую приосевую зону диаметром 360 мм и закругление периферийной части с $R = 20$ мм (см. рис 3).

В первых двух экспериментах с помощью антенн-прототипов показано, что источники высокочастотного радиоизлучения на разных стадиях развития искрового разряда генерируются в различных областях разрядного промежутка. На лавинной стадии источники обычно локализируются в области анода, на стадии формирования и развития стримеров в разрядном промежутке на расстоянии 10-15 см от электродов. Полученные результаты согласуются с теоретическими предположениями и результатами, полученными другими диагностиками.

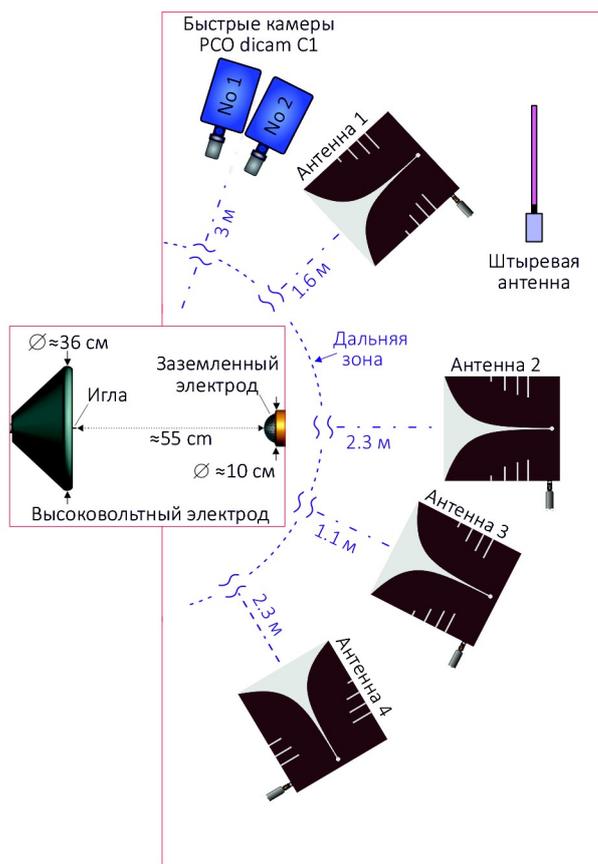


Рис. 3 Разрядный промежуток экспериментальной установки и приборы для регистрации электромагнитного излучения сантиметрового (антенны Вивальди) и дециметрового диапазона (штыревая антенна) и визуализации структуры разряда (PCO Камеры).

Во второй части третьей главы представлены методы калибровки диагностического оборудования, предназначенного для локализации СВЧ вспышек сантиметрового диапазона, при помощи компактного СШП-источника радиоизлучения. Этот генератор ВЧ импульсов располагался в пяти положениях внутри разрядного промежутка установки ЭРГ (рис. 4). Во всех калибровочных сериях, каждая из которых состоит из 50 событий, статистические центры локализованных источников не совпадают с геометрическим центром микроволнового генератора. Каждый статистический центр удален от геометрического центра примерно на 13 см (рис. 4А), что указывает на определенную постоянную ошибку при решении задачи локализации. Такая ошибка может быть вызвана разбросом задержек на трактах передачи сигнала, который не может быть измерен с точностью, превышающей точность измерений осциллографа. Разброс источников зависит так же от способа отбора вспышек внутри четырёх коррелирующих сигналов.

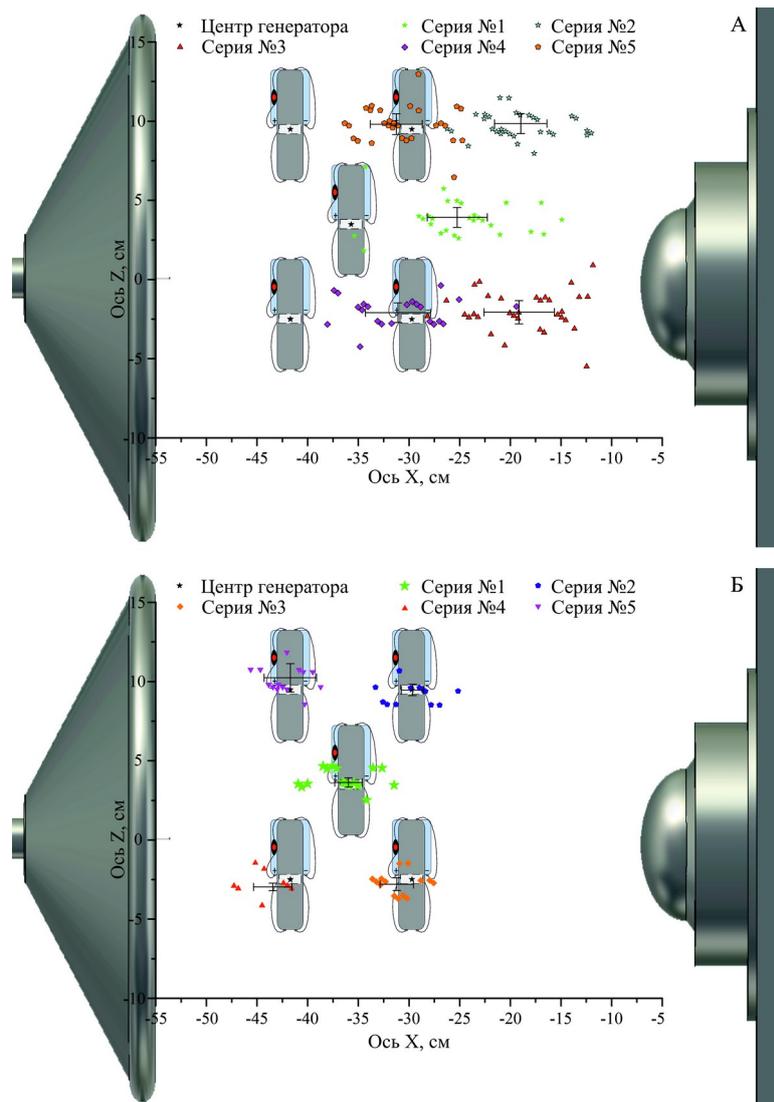


Рис. 4 Источники СВЧ-излучения локализованные в 5 калибровочных сериях по 50 событий. (А) по точке выхода из шума, без корректировки систематической ошибки (Б) по точке максимума вспышки с корректировкой систематической ошибки.

Разработан математический метод корректировки постоянной и систематических ошибок локализации, а так же алгоритм отбора локализуемых, коррелирующих вспышек СВЧ излучения, полученного со всех четырёх антенн. Результаты локализации источников с учетом этих поправок представлены на рисунке 4Б. Все локализованные источники находятся в пределах высоты генератора (отклонение не превышает 4 см). Здесь среднее стандартное отклонение положений источников

относительно их статистических центров во всех пяти сериях не превышает 2-3 см.

В третьей части третьей главы показано, что источники СВЧ-излучения локализуются с сантиметровой точностью при протяженных разрядах, генерируемых установкой ЭРГ. Описана характерная динамика развития разряда и её временная корреляция с СВЧ-излучениями. Установлено, что интенсивное СВЧ-излучение генерируется в течение нескольких сотен наносекунд на стадии формирования разряда перед пробоем разрядного промежутка. Статистика показывает, что начало СВЧ-излучения совпадает со стадиями разряда, когда встречные стримеры, исходящие от заземленного электрода, направляются к высоковольтному электроду (при отрицательной полярности подаваемого высоковольтного импульса) или первые стримеры от высоковольтного электрода подойдут к заземленному электроду (с положительной полярностью подаваемого высоковольтного импульса). Отмечается, что СВЧ-излучение наблюдается также при формировании протяженного диффузионного разряда в зазоре, при этом интенсивность излучения постепенно снижается вплоть до появления узких ярких токовых каналов, похожих на длинные искры. При увеличении и объединении таких каналов СВЧ-излучение не наблюдается. Распределения локализованных источников СВЧ излучения получены для обеих полярностей высоковольтного импульса, подаваемого на протяженный разрядный промежуток. Показано, что со статистической точки зрения при обеих полярностях подавляющее большинство источников сосредоточено в приэлектродных областях. На примере одиночных снимков показана характерная динамика структуры разряда в областях локализованного СВЧ-излучения. Продемонстрировано, что механизм генерации наиболее интенсивного СВЧ-излучения в лабораторном высоковольтном разряде может быть связан с такими

базовыми процессами, как лобовое столкновение стримеров противоположной полярности или взаимодействие одиночных стримеров с приэлектродной плазмой на поверхности металлических электродов.

В четвёртой главе описывается подход, позволяющий определить стадии пробоя протяженного высоковольтного разряда, сопровождающиеся излучением широкополосного радиоизлучения, а также детально исследовать частотно-временные характеристики радиоизлучения. Для этого были использованы различные техники диагностики радиоизлучения в МГц и ГГц диапазонах частот наряду с быстрой съёмкой собственного свечения разряда на наносекундных масштабах времени. Также были проведены высокочастотные радиоинтерферометрические измерения областей разряда, связанных с началом эмиссии ВЧ-радиоизлучения. Результаты исследований показали, что существует тесная связь между генерацией радиоизлучений во время развития разряда и интенсивным размножением многочисленных стримеров противоположной полярности.

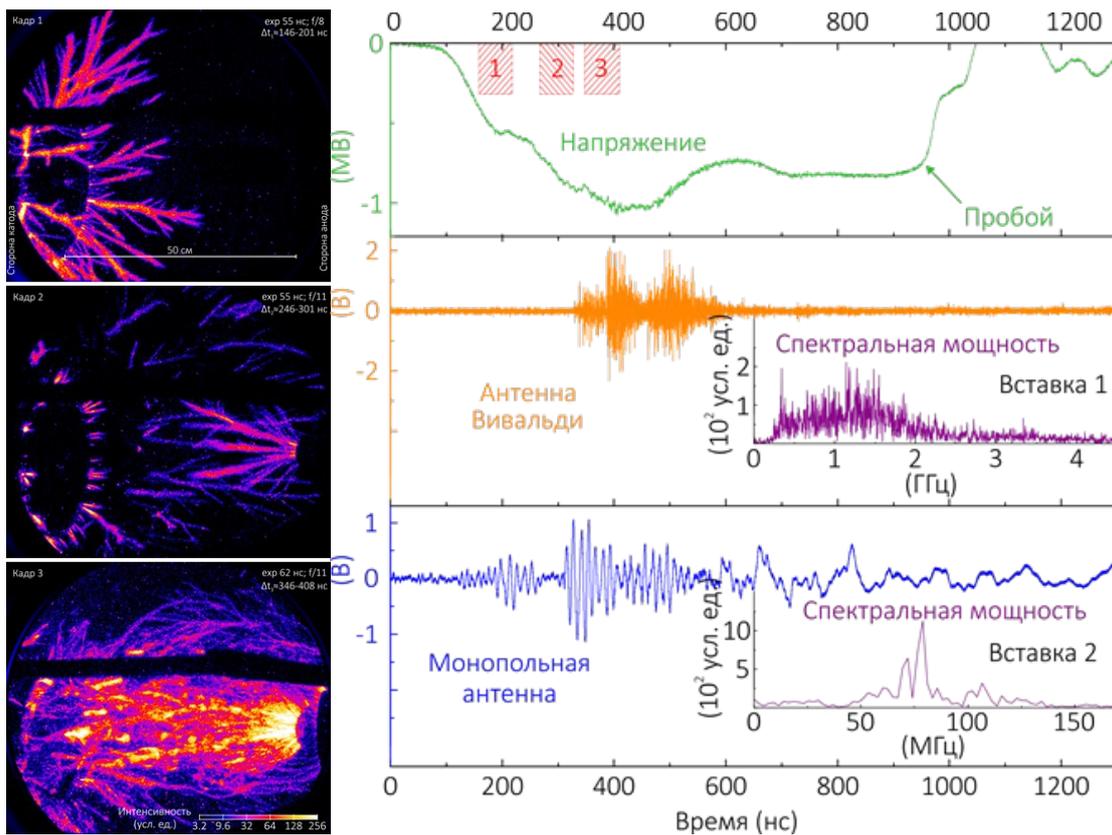


Рис. 5. Осциллограмма напряжения, сигналы ВЧ- и НЧ-радиоизлучения и их интегральные спектры («вставки 1 и 2»), полученные в одиночном выстреле. Цифры 1–3 на верхней панели изображения обозначают временные интервалы Δt_1 , Δt_2 и Δt_3 , в которых регистрировались кадры 1–3, изображенные на левой части рисунка.

Наблюдаемые СВЧ-излучения характеризуются частотами в пределах 1-6 ГГц, при этом характерная мощность всплесков уменьшается со временем. Очень высокие частоты (до 6 ГГц) наблюдаются в отдельных одиночных вспышках, регистрируемых на том промежутке времени, когда напряжение в разрядном промежутке достигает своих максимальных значений.

Основные результаты работы

В работе представлены расчет, моделирование и разработка двух моделей сверхширокополосной антенны с расширяющейся щелью.

Показано что выбранный тип разработанных антенн подходит для применения в экспериментах по регистрации и исследованию радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда.

Предложен и подробно описан метод калибровки диагностического оборудования предназначенного для локализации СВЧ вспышек сантиметрового диапазона при помощи компактного СШП-источника радиоизлучения. Показаны, способ корректировки и исправления статистической ошибки, возникающей при локализации координат источника.

Показано, что источники высокочастотного радиоизлучения на разных стадиях развития искрового разряда генерируются в различных областях разрядного промежутка, а так же, что на различных стадиях развития искрового разряда радиоизлучение имеет различные морфологические характеристики и вероятно имеет различную природу.

Исследована временная корреляция электромагнитных излучений в диапазонах ОВЧ (порядка 10-100 МГц), УВЧ (на частотах в пределах 1-6 ГГц) для лабораторного высоковольтного разряда, инициируемого в длинном воздушном зазоре. Поведение различных электромагнитных излучений дополнительно сравнивается с началом нарастания тока через разрядный промежуток и динамикой разрядного напряжения. Полученные результаты позволяют сформировать информативную хронологическую картину электромагнитных излучений разряда, которая может быть полезна при проведении специальных экспериментов, направленных на выявление механизмов генерации излучений искрового разряда (рентгеновского и радиоизлучения в частности).

Публикации автора по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах, индексируемых в базах данных *Web of Science* и *Scopus*:

1. Baidin, I. S., Rodionov, A. A., Oginov, A. V., Shpakov, K. V., Localization of radio emission source in the initial phase of the spark discharge //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2021. – Т. 48. – С. 349-352.
2. Байдин И. С., Огинов А. В., Паркевич Е. В., Сверхширокополосная антенна для регистрации радиоизлучения в начальной фазе высоковольтного лабораторного атмосферного разряда //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 12. – С. 1910-1915.
3. Parkevich E.V., Shpakov K.V., Baidin I.S., Rodionov A.A., Khirianova A.I., Khirianov T.F., Bolotov Ya.K., Medvedev M.A., Ryabov V.A., Kurilenkov Yu.K., and Oginov A.V., Streamer formation processes trigger intense x-ray and high-frequency radio emissions in a high-voltage discharge //Physical Review E. – 2022. – Т. 105. – №. 5. – С. L053201.
4. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F., Baidin I. S., Shpakov K. V., Rodionov A. A., Bolotov Ya. K., Ryabov V. A., Kurilenkov Yu. K., Samoylov I. S., Ambrozevich S. A., Oginov A. V., Electromagnetic emissions in the MHz and GHz frequency ranges driven by the streamer formation processes //Physical Review E. – 2022. – Т. 106. – №. 4. – С. 045210.
5. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F., Baidin I. S., Shpakov K. V., Tolbukhin D. V., Rodionov A. A., Bolotov Ya. K., Ryabov V. A., Ambrozevich S. A., Oginov A. V., Natural sources of intense ultra-high-frequency radiation in high-voltage atmospheric discharges //Physical Review E. – 2023. – Т. 108. – №. 2. – С. 025201.
6. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F., Baidin I. S., Shpakov K. V., Rodionov A. A., Bolotov Ya. K., Ryabov V. A., Ambrozevich S. A., Oginov A. V., Spectral and Temporal Characteristics of UHF Radiation

Generated by a Miniature Electric Spark //Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – Т. 50. – №. 11. – С. 480-485.

7. Parkevich E. V., Khirianova A. I., Khirianov T. F., Baidin I. S., Shpakov K. V., Rodionov A. A., Bolotov Ya. K., Ryabov V. A., Ambrozevich S. A., Oginov A. V., Temporal correlation between hard x rays and radio emissions in the MHz and GHz frequency ranges generated by a laboratory high-voltage discharge //Journal of Applied Physics. – 2023. – Т. 134. – №. 15.

8. Байдин И. С., Огинов А. В., Паркевич Е. В., Хирьянова А. И., Шпаков К. В. Высокоэффективный метод калибровки системы локализации точечных источников СВЧ-излучения // Письма в ЖТФ, 2024, том 50, вып. 18 – С. 32-35.

Главы в монографиях:

И.С. Байдин, Е.В. Паркевич, А.И. Хирьянова, Т.Ф. Хирьянов, К.В. Шпаков, А.А. Родионов, Я.К. Болотов, В.А. Рябов, Ю.К. Куриленков, А.В. Огинов. «Радио-вспышки в МГц и ГГц диапазонах частот, обусловленные процессами формирования стримеров». Глава в коллективной монографии «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы импульсной электронике и оптоэлектронике» под ред. Г.А. Месяца. — Москва : РУСАЙНС, 2022. — 290 с., стр. 34-53. ISBN 978-5-466-02607-8

Публикации в трудах конференций:

1. Байдин И.С., Агафонов А.В. Родионов А.А. Огинов А.В., Шпаков К.В, «Разработка и использование сверхширокополосных антенн для регистрации радиоизлучений высоковольтного лабораторного атмосферного разряда», Сборник тезисов XLV Международной (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 2018 г.

2. Baidin I. S., Oginov A. V., Rodionov A. A., Agafonov A. V. and Shpakov K. V., «*Development and use of super-wide band antennas for registration of radio emissions of high-voltage laboratory atmospheric discharge*», XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, 2018

3. Baidin I. S., Oginov A. V., Rodionov A. A., Agafonov A. V., Shpakov K. V., «*Recording and analysis of radio emissions in the initial phase of the spark atmospheric discharge*», Сборник тезисов докладов XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Elbrus, 2019

4. Байдин И.С., Агафонов А.В. Родионов А.А. Огинов А.В., Шпаков К.В, «*Исследование и локализация источника радиоизлучений высоковольтного лабораторного атмосферного разряда с помощью сверхширокополосных антенн*», Сборник тезисов докладов XXXV International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2020).

5. Байдин И.С., Медведев М.А., Огинов А.В., Паркевич Е.В., Шпаков К.В., «*ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ АТМОСФЕРНОМ ИСКРОВОМ РАЗРЯДЕ*», Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», Сборник тезисов докладов молодых ученых (БПИО 2021).

6. Байдин И.С., Огинов А.В., Паркевич Е.В., Шпаков К.В., «*Многоканальная система регистрации и локализации СВЧ излучения в начальной стадии высоковольтного импульсного искрового разряда*». Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», Сборник тезисов докладов молодых ученых (БПИО 2022).

7. BAIDIN I.S., OGINOV A.V., PARKEVICH E.V., SHPAKOV K.V., «*ULTRA-WIDEBAND RADIO INTERFEROMETRY FOR MAPPING*

THE SOURCES OF THE MICROWAVE FLASHES IN THE GHZ FREQUENCY RANGE», Сборник тезисов 8-й Международного конгресса по потокам энергии и радиационным эффектам EFRE-2022, Томск.

8. Байдин И.С., Огинов А.В., Паркевич Е.В., А. И. Хирьянова, Шпаков К.В., *«Особенности генерации всплеск СВЧ излучения в начальной фазе высоковольтного лабораторного искрового разряда.»* Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике», Сборник тезисов докладов молодых ученых, стр. 11, (БПИО 2023)

9. Baidin I.S., Oginov A. V., Parkevich E.V., Khirianova A.I., Shpakov K.V., *«Localization and spectral-temporal characteristics of microwave sources in high-voltage spark discharge»* XXXIX Fortov International Conference on Equations of State for Matter (ELBRUS 2024)

10. Байдин И.С., Виноградова К.С., Огинов А.В., Павлова П.А., Паркевич Е.В., Тарасенко А.А., Хирьянова А.И., Шпаков К.В. *«Спектрально-временные и пространственные характеристики источников СВЧ в предпробойной стадии высоковольтного искрового разряда»*, Сборник тезисов X Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии - ЛаПлаз-2024»