

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Огинов Александр Владимирович

Москва 2024

# Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Излучение, генерируемое в начальной фазе искрового разряда.....	12
1.1 Краткое описание теорий и обзор актуальных работ по теме исследования .....	12
1.2 Пробой на убегающих электронах. ....	14
1.3 Механизм генерации СВЧ излучения в области столкновения стримеров противоположной направленности .....	18
1.4 Результаты 1 главы .....	22
Глава 2. Расчет, моделирование и верификация сверхширокополосных антенн. ....	23
2.1 Сверхширокополосная антенна Вивальди копланарного типа.....	23
2.2 Расчет и моделирование антенны.....	24
2.3 Верификация антенны .....	29
2.5 Второе поколение антенн .....	33
2.6 Апробация результатов.....	38
2.7 Результаты 2 главы .....	43
Глава 3. Локализация источника радиоизлучения искрового разряда.....	45
3.1 Описание установки ЭРГ .....	45
3.2 Локализация источника радиоизлучения двумя антеннами .....	47
3.4 Локализация источника радиоизлучения четырьмя антеннами .....	55
3.4.1 Калибровка системы радио регистрации из четырех антенн Вивальди .....	58
3.4.2 Локализация источников СВЧ излучения системой радио регистрации из четырех антенн Вивальди .....	64
3.5 Результаты 3 главы .....	73
Глава 4. Временные и частотные характеристики радиоизлучения искрового разряда .....	75
4.1 Особенности одновременной регистрации ВЧ и СВЧ излучения.....	75
4.2 Эволюция временной структуры и спектра радиосигналов.....	78
Заключение по главе 4 .....	82
Заключение .....	84
Список литературы .....	86

## Введение

Явление молнии занимало умы многих людей на протяжении веков и тысячелетий. И на данный момент интерес ученых к этому явлению не угасает. Как следует из анализа литературы, наибольший интерес вызывает начальная стадия пробоя атмосферного промежутка. В настоящее время во многих уголках земного шара, как в лабораториях, так и в полевых условиях ведутся активные исследования атмосферных разрядов, которые охватывают широкий диапазон условий наблюдения и изучения данного явления.

Исследование процессов в атмосферном разряде, 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.

К сожалению, 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.

**Целью** научно-квалификационной работы является регистрация и изучение СВЧ излучений, регистрируемых в начальной фазе сильноточного атмосферного искрового разряда. Для достижения этой цели необходимо разработать под нужды эксперимента сверхширокополосную антенну. С её помощью поставить ряд экспериментов по регистрации сигналов СВЧ в различных условиях протекания искрового разряда. Провести калибровку системы регистрации и с её помощью локализовать источник радиоизлучения во времени и в пространстве. Получить и проанализировать спектры радиоизлучений, генерируемых на различных стадиях формирования искрового разряда.

**Научная новизна:** 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:** 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.

#### **Основные 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.

**Апробация работы.** 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.

Основные результаты работы опубликованы в виде 8 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, индексируемых в системе Web of Science (см. Публикации в журналах [1-8]) и в виде главы коллективной монографии (см. Глава в монографии).

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

#### **Публикации в журналах из перечня ВАК, индексируемых в системах 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»

**Личный вклад:** Автором лично проведен расчет и моделирование сверхширокополосных антенн типа Вивальди и их модификаций, приведённых в данной работе. Все экспериментальные результаты были получены либо 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.

**Объем и структура работы:** Работа состоит из введения, четырёх глав и заключения. Во введении рассматривается объект исследования, актуальность исследования, сформулированы цель работы, научная новизна и практическая значимость проведенного исследования. Литературный обзор и теоретические подходы к проблеме рассматриваются в первой главе. Во второй главе представлены расчет, моделирование и верификация в лабораторных условиях сверхширокополосных антенн. В третьей главе рассматриваются методы калибровки системы регистрации и локализации радиоизлучения с помощью нескольких антенн. В четвертой главе описаны временные характеристики радиоизлучения, а так же его связь с другими излучениями, генерируемыми в начальной фазе высоковольтного протяженного искрового разряда в воздухе. Полный объем работы составляет 91 страниц с 39 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 50 наименований.

# Глава 1. Излучение, генерируемое в начальной фазе искрового разряда.

## 1.1 Краткое описание теорий и обзор актуальных работ по теме исследования

Генерация радиочастотного излучения во время формирования естественных молний на частотах более 500 МГц были впервые зарегистрированы Такаги и Такеути в 1963 [1]. Затем Бруком и Китагавой в 1964 году [2], которые сообщили о наблюдении радиоизлучений на частоте 0,85 ГГц с полосой 200 кГц, утверждая, что наблюдаемые излучения совпадают с отрицательным ступенчатым лидером, обратным ударом, молниевым лидером. В настоящий момент ведутся натурные измерения радиоизлучений от отрицательных ступенчатых лидеров молний в диапазоне 1,5–1,6 ГГц [3]. Излучение наблюдалось с помощью керамической микрополосковой антенны и цифрового радиоприемника, настроенного на центральную частоту 1,63 ГГц с полосой рабочих частот 2 МГц. Авторы обнаружили, что отрицательный ступенчатый лидерный пробой, среди других процессов, связанных с молнией, активно излучает в этом диапазоне частот. Из-за узкой полосы пропускания антенны это исследование не смогло разрешить импульсы длительностью менее 0,5 мкс и, следовательно, не смогло различить более короткие процессы, потенциально вносящие вклад в излучаемый сигнал. О наличии импульсов наносекундного диапазона сообщается в лабораторных наблюдениях [4], где авторы показали, что радиочастотное излучение в диапазоне УВЧ существует в области, где взаимодействуют и сталкиваются встречные стримеры. Лабораторный эксперимент, в котором облако капель воды электрически заряжалось до более чем 1 МВ, показал, что наиболее интенсивный всплеск

микроволнового излучения, достигающий диапазона УВЧ, был вызван вспышками стримеров на стадии распространения лидера. Это было связано с импульсом электромагнитного поля со средним временем нарастания 50–100 пс, который они приписали столкновению стримеров.

В ряде работ различных авторов сообщается об одновременной регистрации жесткого рентгеновского излучения и радиоизлучения в полосе ВЧ и СВЧ диапазона. В [5] авторы показывают, что рентгеновский всплеск, наблюдаемый в длинных искрах, вероятно, вызван встречей отрицательного и положительного фронтов стримеров. Процесс пробоя инициируется после встречи двух фронтов стримеров и наличие рентгеновского всплеска за микросекунду до окончательного пробоя свидетельствует о том, что взаимодействие двух стримерных систем является причиной рентгеновского всплеска. Наличие же нескольких рентгеновских всплесков, может свидетельствовать о развитии ступенчатых процессов, связанных с ступенчатыми пространственными лидерами.

В [6,12] авторы регистрируют импульсы рентгеновского и радиоизлучения в лабораторном разряде при помощи сцинтилляционного детектор (NaI (Tl) и LaBr3) и приемника, настроенного на 2,4 ГГц с полосой пропускания 5,5 МГц. Максимум мощности регистрируемого радиоизлучения совпадает с моментом генерации рентгеновского излучения (в масштабе единиц микросекунд).

Шаговый процесс грозового лидера в радиодиапазоне рассматривается в работе [10]. Всплески излучения наблюдались на частоте 63 МГц, однако с разрешением, затруднявшим однозначные выводы. Более точное и подробное исследование механизма распространения отрицательного лидера и его ВЧ радиоизлучения проводится авторами [11]. Сигналы регистрируются на частоте 200 МГц, и относительное время прихода каждого импульса

измеряется с точностью около 1 нс. Авторы показывают, что каждый шаг лидера испускает серию из нескольких дискретных ВЧ импульсов радиоизлучения.

При этом получено множество результатов, необъяснимых с точки зрения классической теории пробоя: в частности, последние эксперименты установили, что электрическое поле в грозовых облаках существенно ниже критического поля классического электрического пробоя [17,18].

Обычно рассматривается несколько возможных механизмов генерации излучений, так или иначе связываемых с ускорением до высоких энергий так называемых убегающих электронов в сильном электрическом поле в воздухе [15].

## 1.2 Пробой на убегающих электронах.

Обычный пробой возникает вследствие нагрева электронов в электрическом поле. При этом быстрые электроны, принадлежащие хвосту функции распределения, становятся способными ионизовать вещество и, следовательно, генерировать новые свободные электроны. Медленные же электроны исчезают вследствие рекомбинации в объеме или на стенках разрядной камеры. При достижении достаточно высокого значения электрического поля генерация новых электронов за счет ионизации превосходит их исчезновение в результате рекомбинации, и их количество начинает экспоненциально возрастать. Это явление называется электрическим пробоем вещества. Характерные энергии электронов, осуществляющих ионизацию, составляют 10–20 эВ; рекомбинация происходит, в основном, при низких энергиях. Поэтому средняя энергия электронов  $\bar{\varepsilon}$ , при которой возникает пробой, обычно не превосходит нескольких электрон-вольт. Например, в воздухе  $\bar{\varepsilon} \sim 2$  эВ.

Однако, возможен и другой процесс, который имеет существенно иную природу и получил название пробоя на убегающих электронах (ПУЭ). В данной работе теория будет рассмотрена кратко, с целью показать, что на установке ЭРГ реализованы условия для проведения эксперимента, параметры которого укладываются в теорию пробоя на убегающих электронах. Более подробно с теоретическим материалом можно ознакомиться, прочитав статьи [15-21]. В основе пробоя на убегающих электронах лежат особенности взаимодействия быстрых частиц с веществом. Теория ПУЭ впервые была изложена в работе А.В. Гуревича, Г.М. Милиха и Р.А. Рассела-Дюпре (1992 г.) [17].

В обычном механизме холодного пробоя (с нерелятивистскими электронами) на убегающих электронах (ПУЭ) «убегание» электронов с энергией  $E > 100$  эВ из высокоэнергетического хвоста теплового распределения происходит в поле выше критического ( $E_c = 300$  кВ/см). Затравочные электроны возникают естественным путем при ионизации газа на концах стримеров, но поле должно превышать обычное пробойное на порядок.

Другой возможный механизм — пробой на релятивистских электронах, который может быть реализован в электрических полях с напряженностью десятки и сотни мегавольт на сантиметр ( $E_{cn}$ ), с пороговой напряженностью электрического поля для развития лавины убегающих электронов  $E_{rb} = 2,8$  кВ/см. Это более чем на порядок меньше, чем необходимо для обычного пробоя в воздухе ( $E \approx 30$  кВ/см). Для его развития необходимы затравочные быстрые электроны с энергией от единиц кэВ, достаточные расстояния (сотни метров вблизи порога) и соответствующие разности потенциалов (десятки мегавольт).

Все электроны плазмы быстро переходят в режим ускорения. Высокие поля, близкие к  $E_{cn}$ , используются в сильноточной электронике. Отношение напряженностей критических полей:

$$\frac{E_{cn}}{E_c} \approx \frac{mc^2}{2.72\alpha\tilde{\epsilon}} \approx 200 \quad (1),$$

где  $m$  – масса электрона,  $c$  – скорость света,  $\alpha$  – безразмерный коэффициент,  $\tilde{\epsilon}$  – средняя энергия электронов.

Таким образом, пробой на убегающих электронах происходит в относительно слабом поле, которое гораздо меньше не только поля  $E_{cn}$ , но и порогового поля обычного пробоя  $E_{th}$ .

Таким образом, явление ПУЭ связано с генерацией вторичных электронов, появляющихся вследствие ионизации быстрыми убегающими частицами нейтральных молекул. Хотя основная масса вторичных электронов имеет малые энергии, могут родиться и электроны с достаточно большой энергией  $\epsilon > \epsilon_c$  ( $\epsilon_c$  – критическая энергия убегания для электрона). Такие электроны тоже станут убегающими, т.е. будут ускоряться полем и в свою очередь могут при ионизации генерировать частицы с  $\epsilon > \epsilon_c$ . В результате появляется экспоненциально нарастающая лавина убегающих электронов. Вместе с ними генерируется и большое количество медленных электронов, что в конечном счете и приводит к электрическому пробоею вещества. Важно, что пробой на убегающих электронах происходит в относительно слабом поле  $E > E_c$ , которое на порядок меньше порогового поля обычного пробоя  $E_{th}$ . Например, в воздухе при атмосферном давлении  $E_{th} \cong 23 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ ,  $E_c \cong 2,16 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$ .

Для осуществления пробоя на убегающих электронах недостаточно выполнения только одного условия  $E > E_c$ . Необходимо также наличие затравочных быстрых электронов с энергией, превосходящей критическую



энергию убегания  $\varepsilon > \varepsilon_c \geq (0.1-1\text{МэВ})$ . Что еще более важно, пространственный размер области с постоянным электрическим полем в веществе  $L$  должен существенно превосходить характерную длину экспоненциального нарастания лавины убегающих электронов  $L \gg l_a$ , где  $l_a$  – длина генерации убегающих электронов:

$$l_a = \frac{(mc^2)^2}{2\pi Z N_m e^4} \cdot \frac{E_c}{E} \quad (2),$$

где  $Z$  – среднее число электронов в молекуле,  $N_m$  – плотность молекул,  $e$  – заряд электрона.

Последняя величина в газовых средах оказывается весьма значительной, что, в основном, и затрудняет реальное осуществление в лабораторных условиях рассматриваемого эффекта. Например, в воздухе при атмосферном давлении  $l_a \sim 50$  м:

Вместе с тем в грозовой атмосфере ситуация существенно иная. Характерные размеры облаков  $L$  всегда много больше  $l_a$ . Быстрые затравочные электроны также всегда есть — они эффективно генерируются космическими лучами (плотность потока вторичных электронов космических лучей с энергией  $E \geq 1$  МэВ порядка  $10^3 (\text{м}^2\text{с})^{-1}$  частиц). Поэтому осуществление пробоя на убегающих электронах в грозовых облаках оказывается вполне возможным при достижении электрическим полем значения  $E_c$ . И такие поля, как показывают измерения, действительно наблюдаются. Именно пробой на убегающих электронах, по-видимому, играет определяющую роль в обнаруженных в последнее время таких замечательных явлениях, как гигантские высотные разряды между грозовыми облаками и ионосферой ("спрайт") (смотри рис. 1.1), мощные всплески гамма-излучения, нейтронного, вспышки рентгеновского излучения и др.

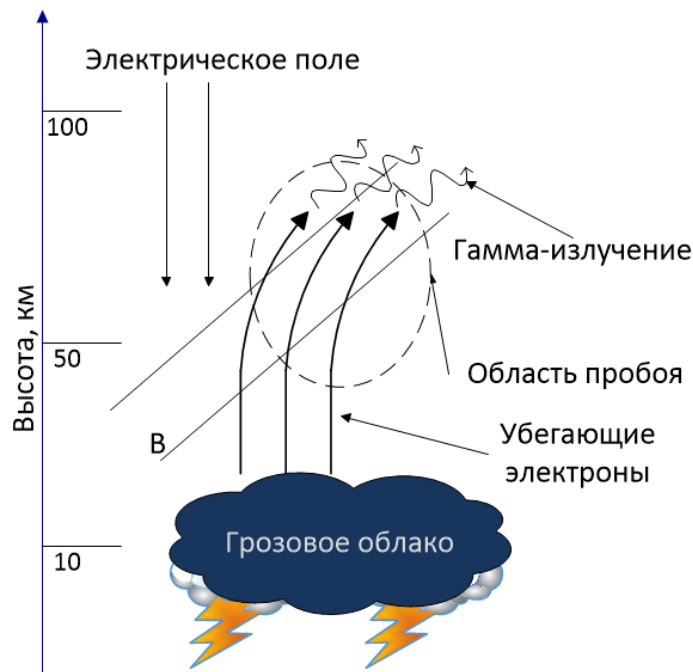


Рис. 1.1 Лавина убегающих электронов, ускоренная электрическим полем, создаёт атмосферный пробой выше грозовой облачности, вызывая кратковременное свечение атмосферы – спрайты

При этом движение убегающих электронов в воздухе и взаимодействие с электродами сопровождается тормозным излучением.

### 1.3 Механизм генерации СВЧ излучения в области столкновения стримеров противоположной направленности

Стримерные разряды отмечают начальные стадии различных явлений плазменного разряда, что делает инициирование и распространение стримера важным предметом исследования. Согласно общепринятой теории пробоя, электрический пробой происходит, когда электрическое поле превышает пороговое значение пробоя ( $E_k$ ) при нормальном атмосферном давлении  $E_0 \geq E_k \approx 32$  кВ/см в воздухе. Это значение определяется равенством между коэффициентами ионизации электронным ударом и диссоциативного прилипания. Процесс пробоя начинается, когда первичный затравочный электрон, помещенный в сильное электрическое поле, превышающее

критическое ( $E \geq E_k$ ), инициирует электронную лавину. Лавина протекает с экспоненциальным увеличением свободных электронов и положительных ионов. Мик в [22] в 1940 предположил, что как только число свободных электронов увеличивается до критического значения ( $N_e \sim 10^8$ , при давлении земли, в воздухе), электрическое поле, создаваемое пространственным зарядом, начинает искажать окружающее поле [23]. Затем процесс управляется вновь созданной областью сильного поля, называемой доменом ионизации, и инициируется самоподдерживающаяся волна ионизации, или стример.

Стримеры — это нити холодной плазмы, которые предшествуют более горячим плазменным разрядам, таким как искры или лидеры. Они могут быть инициированы гидрометеорами в окружающем электрическом поле ниже обычного порогового поля пробоя воздуха  $E_k$  [24], при котором ионизация электронным ударом происходит с той же скоростью, что и процесс присоединения двух электронов.

При максимальном электрическом поле внутри грозового облака, измеренном за последние несколько десятилетий, которое никогда не превышало  $0,3 E_k$  [25; 26], то, как инициируется молния, остается одним из важнейших вопросов в атмосферной науке. Чтобы ответить на этот вопрос, [27] предположил, что гидрометеоры в условиях слабого окружающего электрического поля ( $E_0 < E_k$ ) могут усиливать поле в своей окрестности, позволяя инициировать стримерные разряды. Гидрометеоры широко распространены в грозовых средах и различаются по размерам и форме [28]. Авторы [3] выращивали ледяные гидрометеоры в контролируемой лабораторной среде, по условиям напоминающим грозу, в то время как однородное слабое электрическое поле применялось к окружающей среде. Они обнаружили, что положительные стримеры могут возникать отдельно, но отрицательные стримеры всегда сопровождалась положительными

стримерами. Кроме того, они отметили зависимость зарождения стримера от геометрии гидрометеора и величины окружающего электрического поля, что согласуется с более ранней экспериментальной работой [29, 30]. Исследования, нацеленные на моделирование данных процессов, продемонстрировали, что положительный стример может образовываться и распространяться из изолированного столбчатого пятна ионизации (гидрометеора) в слабом окружающем электрическом поле [9, 31-33], но отрицательное зарождение стримера из изолированного пятна ионизации в условиях слабого поля никогда не наблюдалось. [34] отметили, что геометрия пятна ионизации, окружающее поле, доступный заряд и распределение заряда играют решающую роль в зарождении стримера.

В настоящее время несколько независимых групп изучают радиочастотное излучение от столкновения стримеров, инициированных изолированными гидрометеорами в субпробойных окружающих полях, чтобы расширить предыдущую работу. В частности они используют конусообразные гидрометеоры, чтобы обеспечить инициацию отрицательных стримеров в субпробойных или слабых полевых условиях [24]. Кроме того, делается фокус исключительно на излучении от столкновений стримеров, что позволяет нам лучше анализировать радиочастотные излучения столкновения без потенциального влияния излучения от распространяющихся стримеров. Сообщается о результатах шести различных моделированиях, изучающих, как радиочастотные излучения от столкновения стримеров зависят от окружающего поля, а также от общей длины, распространяемой встречными стримерами.

Авторы [6,13] проводят численное моделирование распространения и столкновения стримеров в начальной стадии искрового разряда, в случае надпробойного поля  $E_0$  составляющего  $1,5-2 E_k$ ,  $E_k = 32$  кВ/см – пробойное поле в нормальных условиях. Моделирование показало возможность

эффективной генерации электромагнитного излучения с частотами  $10^6 - 10^{10}$  Гц. Причем излучение в диапазоне  $10^7 - 10^8$  Гц связывается с процессами распространения стримеров, возникающих в короне отрицательного ступенчатого лидера, в то время как излучение на частотах выше  $\sim 1$  ГГц в основном создается встречным столкновением стримеров за счет быстрого нарастания тока в области их слияния. В отличие от менее высокочастотного излучения, параметры СВЧ излучения менялись незначительно при изменении скоростей затухания стримеров.

Аналогичные результаты по генерации радиоизлучения в диапазоне от десятков МГц до нескольких единиц ГГц получены на стримерных столкновениях при нормальном атмосферном давлении в случае подпробойного поля  $E_0 < E_k$  [7]. В своей работе авторы демонстрируют возможность генерации СВЧ излучения при столкновении стримеров, возникающих в разрядном промежутке длиной 30 см с приложением к нему напряжения порядка 700 – 900 кВ. Максимум спектра мощности генерируемого излучения составляет 300 МГц. Но он достаточно постоянный в диапазоне от 100 МГц до 1 ГГц и все еще содержит значительную энергию вплоть до 10 ГГц. При этом обычные экспоненциально растущие стримеры могут эффективно генерировать радиоизлучение в диапазоне 3–300 МГц [8], но излучение на более высоких частотах пренебрежимо мало, так как постоянная времени их роста порядка наносекунд. Поэтому важно правильно идентифицировать процессы, которые могут приводить к очень быстрым изменениям тока, необходимым для генерации радиоизлучения соответствующих частотных диапазонов.

Помимо тормозного излучения высокоэнергетических убегающих электронов авторами [35] был предложен механизм генерации излучения схожего по принципу появления с синхротронным излучением. Согласно этому механизму рентгеновское, гамма- и микроволновое излучение могут

генерироваться за счет быстрых электромагнитных поверхностных волн, движущихся с релятивистской скоростью по зигзагообразной траектории разрядного канала.

Потенциальные или ионизационные волны, рассматриваемые в работе [36], распространяющиеся по стримерным каналам из зоны столкновения стримеров, способны увеличивать проводимость стримерных каналов и создавать электрические поля в области соударения достаточно большие для ускорения электронов до релятивистских энергий.

#### 1.4 Результаты 1 главы

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.

## Глава 2. Расчет, моделирование и верификация сверхширокополосных антенн.

### 2.1 Сверхширокополосная антенна Вивальди копланарного типа

Для регистрации радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе высоковольтного искрового разряда, была разработана сверхширокополосная (СШП) антенна, построенная на основе расширяющейся щелевой линии (антенны Вивальди). Антенна Вивальди (АВ) копланарного типа (рис. 2.1) представляет собой диэлектрическую подложку, одна из сторон которой покрыта слоем металлизации в форме расширяющейся щели. Весь излучатель Вивальди делится на три характерные зоны выполняющие различные функции в процессе приема и преобразования сигнала:

- раскрыв – зона, формируемая металлизацией, может иметь различную форму и структуру. Основная функция которой заключается в приеме сигнала;

- преобразователь – зона, в которой полосковая, микрополосковая или коаксиальная линия переходит в сбалансированную щелевую линию, подключенную к раскрыву;

- резонатор – зона, основная функция которой это согласование электрических характеристик антенны и питающей линии. располагается в начале щелевой линии, симметричен.

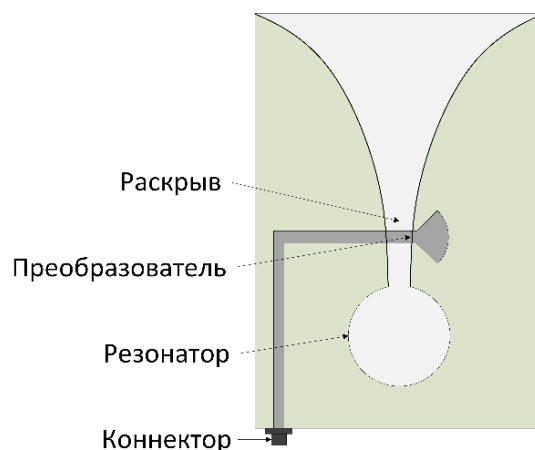


Рис. 2.1 Схематический вид антенны Вивальди

Этот тип антенн был выбран по ряду причин: широкий частотный диапазон (полоса рабочих частот), простота расчетов и изготовления, малые габариты. Малое усиление (порядка 6-8 дБ) можно компенсировать установкой антенны на расстоянии 3-5 метров от разряда. Это позволит находиться уже в «дальней зоне», при этом мощность радиоизлучения останется достаточной для его регистрации этим типом антенн.

## 2.2 Расчет и моделирование антенны

Моделирование и расчет параметров антенны производился в пакете программ CST microwave studio. Конструктивно антенны выполнены в виде медных печатных проводников на стеклотекстолите марки FR-4 толщиной 1,5 мм (см. рис. 2.2). Материал обладает коэффициентом диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 4,5$  (измерено на 1 МГц), а также хорошими прочностными и стоимостными характеристиками. Толщина медного слоя с каждой стороны составляет 45 мкм. К недостаткам FR-4 можно отнести тангенс угла диэлектрических потерь, который достигает значения 0,025 на частотах порядка 1 ГГц и выше. Это негативно сказывается на коэффициенте усиления. Но потери в диэлектрике учитываются при моделировании и расчете антенны, с их учётом мы получаем характеристики антенны, в



первом приближении удовлетворяющие требованиям проводимого эксперимента, и позволяют зарегистрировать ВЧ радиоизлучение, генерирующееся в начальной фазе высоковольтного искрового разряда и оценить его временные и амплитудные характеристики.

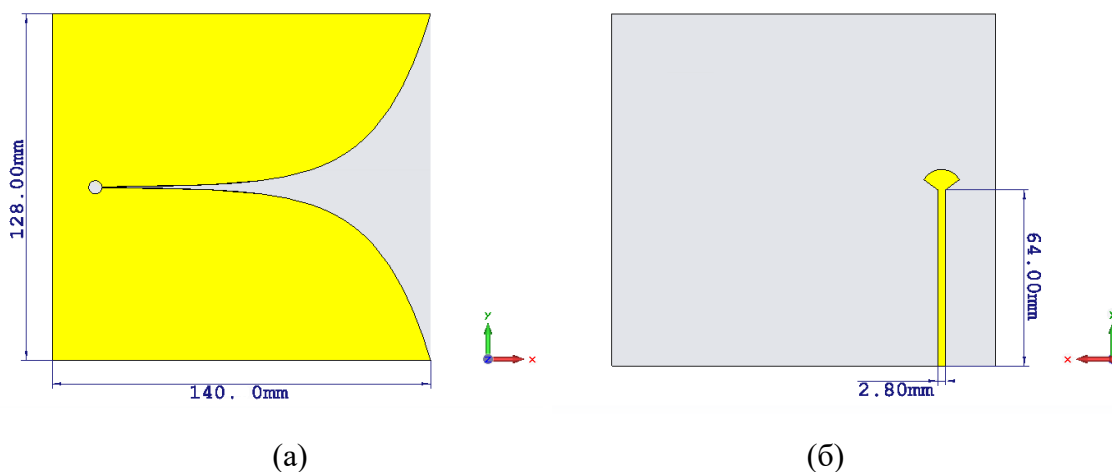


Рис. 2.2 Вид расчетной модели антенны с размерами: (а) – «лицевая» сторона с рабочей зоной и резонатором; (б) – «оборотная» сторона с микрополосковой линией

На основе анализа работ [37,38], раскрыв АВ выполнен в виде расширяющейся по экспоненциальному закону щели,  $U_y = s \cdot \exp(r \cdot x)$ , где  $s = 0,25$  мм – это ширина щели в её основании,  $x$  – координата вдоль оси антенны,  $k = 0,05198$  – коэффициент кривизны, значение которого подбиралось эмпирически.

Согласование волнового сопротивления щели АВ с 50-омным передающим кабелем осуществляется за счет микрополосковой линии. Расчет удовлетворяющих нас параметров импеданса и согласования микрополосковой линии с щелью антенны в точке возбуждения производился с помощью стандартной функции, встроенной в используемую расчетную программу. Для улучшения параметров согласования использовалось расширение на конце микрополосковой линии и резонатор диаметром 10 мм с «лицевой» стороны антенны.

Моделирование вариантов различных геометрий антенны проводилось в несколько итераций с увеличивающейся точностью и плотностью вычислительной сетки, что показало сходимость результатов, при уменьшении размера ячейки. Представленные ниже результаты выполнены для сетки, разбитой с параметрами 699\*674\*46 ячеек. Оптимизированный вариант имеет расчетный коэффициент стоячей волны необходимый в лабораторных измерениях в диапазоне частот от 1,66 ГГц до 9,36 ГГц:

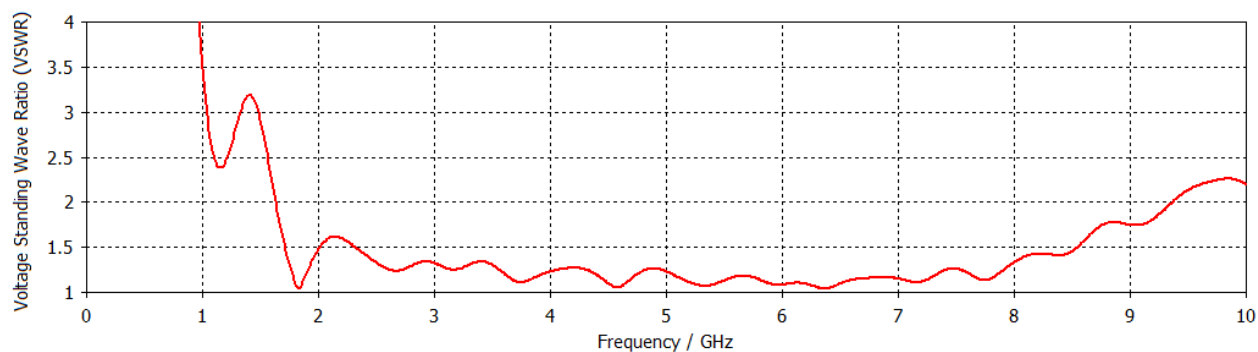


Рис. 2.3 Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)

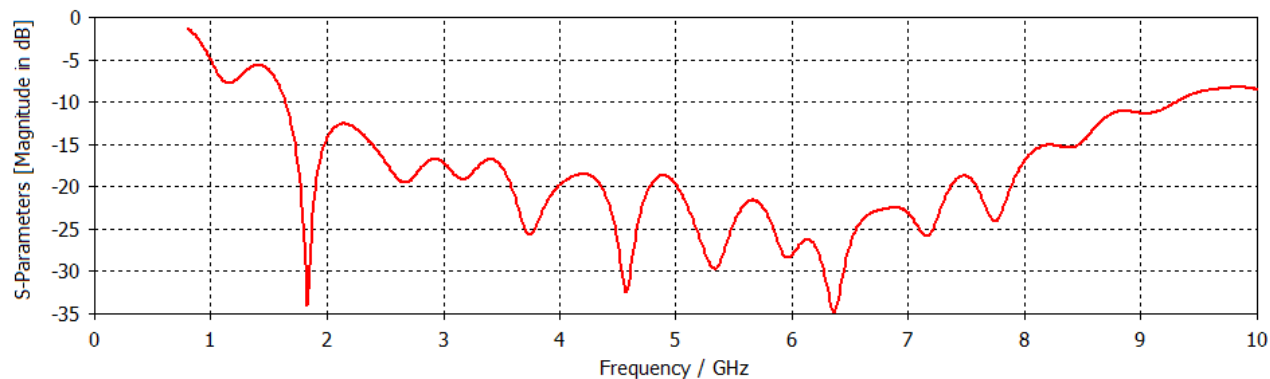


Рис. 2.4  $S_{11}$  обратные потери

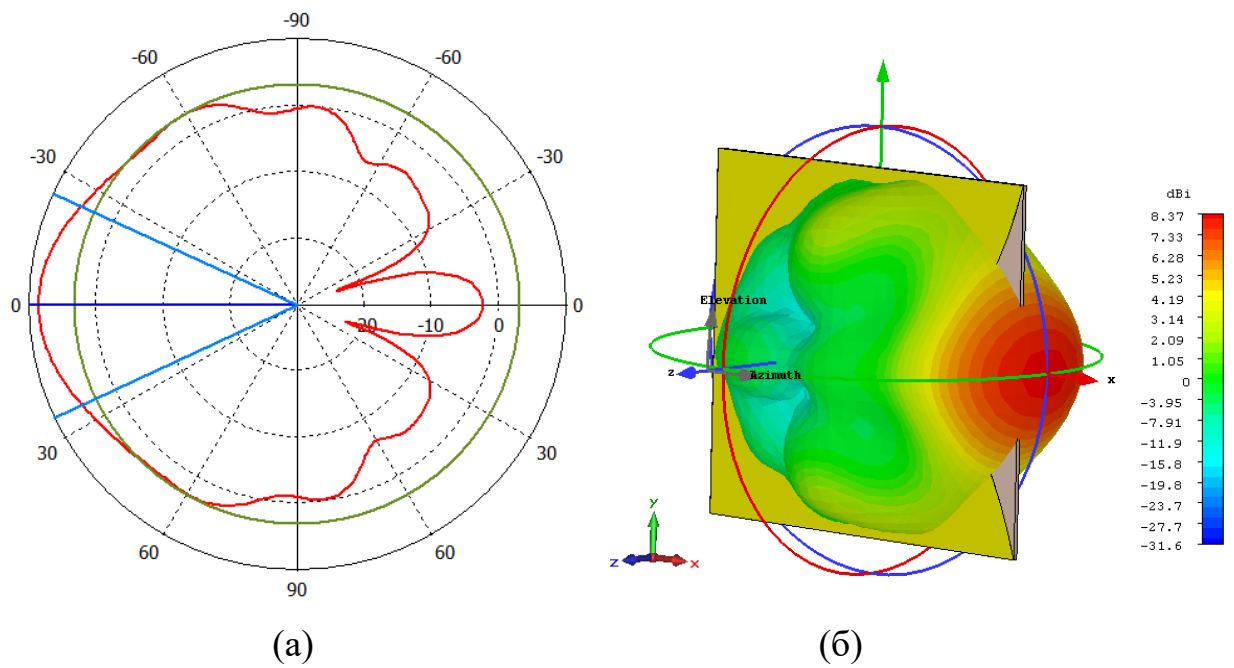


Рис. 2.5 (а) – Диаграмма направленности в плоскости XZ на частоте 3,5 ГГц; (б) – 3d ДН на частоте 3,5 ГГц

Антенна была изготовлена путем фрезерования фольгированного стеклотекстолита на ЧПУ-станке. Для снятия сигнала с антенны используется разъем типоразмера SMA (рис.2.6).

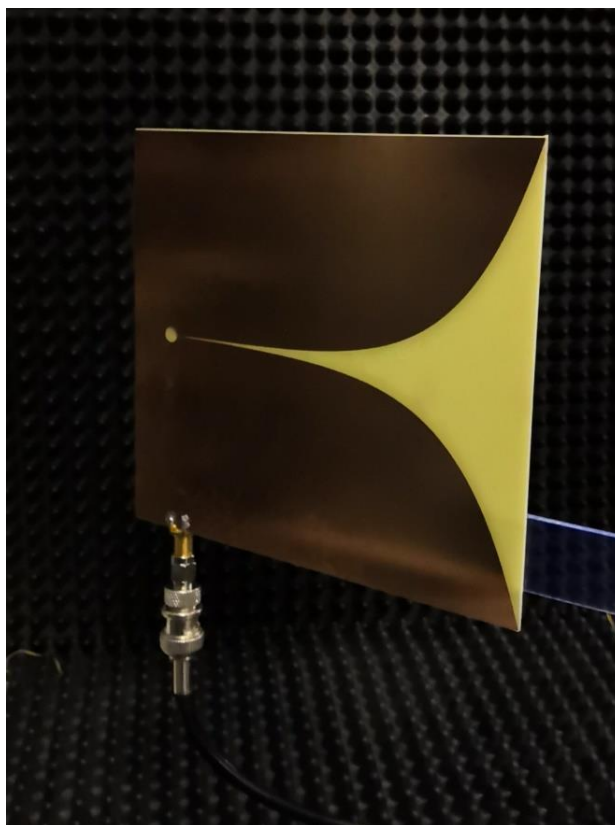


Рис. 2.6 Внешний вид разработанной антенны Вивальди

Таблица 2.1. Характеристики разработанной антенны Вивальди

Рабочий диапазон частот	1,66 – 9,36 ГГц
Поляризация	Линейная
Коэффициент стоячей волны (КСВ) в диапазоне рабочих частот	не более 2,0
Коэффициент усиления (КУ)	КУ не менее 6 дБ с неравномерностью не более 2 дБ в конусе рабочих углов $\pm 25^\circ$
Рабочий диапазон температур	от минус $50^\circ\text{C}$ до плюс $80^\circ\text{C}$
Габариты	140×128×1,55 мм

## 2.3 Верификация антенны

Разработанная антенна использовалась для регистрации радиоизлучения в лабораторном искровом разряде с 5 мм зазором между электродами, имеющими форму игла – плоскость.

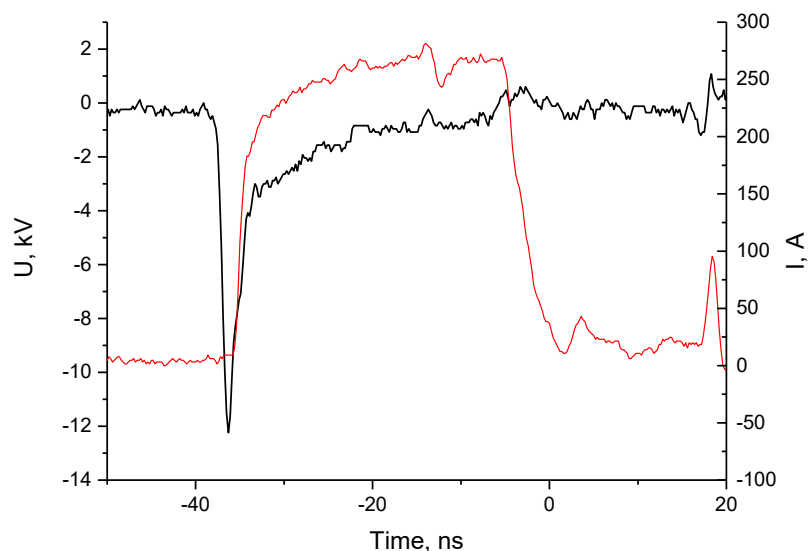


Рис. 2.7 Характеристики разряда: напряжение (слева, чёрный) и ток (справа, красный)

Антенна была установлена на расстоянии трёх метров от лабораторной искры. Радиосигнал от антенны регистрировался осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 ГГц. Передача радиосигнала до регистрирующей аппаратуры осуществляется по коаксиальному кабелю марки LMR-400 длиной 3 метра. Данный тип кабеля отличается от аналогов хорошим экранированием (не менее 90 дБ) и низкими уровнями потерь в кабеле: для частоты 1,5 ГГц – 0,168 дБ/м; для 1,8 ГГц – 0,186 дБ/м; для 2,0 ГГц – 0,196 дБ/м; для 2,5 ГГц – 0,222 дБ/м; для 5,8 ГГц – 0,355 дБ/м. Таким образом, потери в кабеле в диапазоне рабочих частот антенны не превышают 1–2 дБ.

Для оценки влияния электромагнитных наводок на кабель, а также влияния эховых условий в лаборатории и вторичных сигналов, принятых антенной, была поставлена серия экспериментов с подачей импульсного напряжения на высоковольтный электрод, без нагрузки, в режиме «холостого хода». В этой конфигурации видно, что при работе всей аппаратуры и генератора напряжения в отсутствие протекания основного тока разряда высокочастотное радиоизлучение отсутствует (рис. 2.8 а, б).

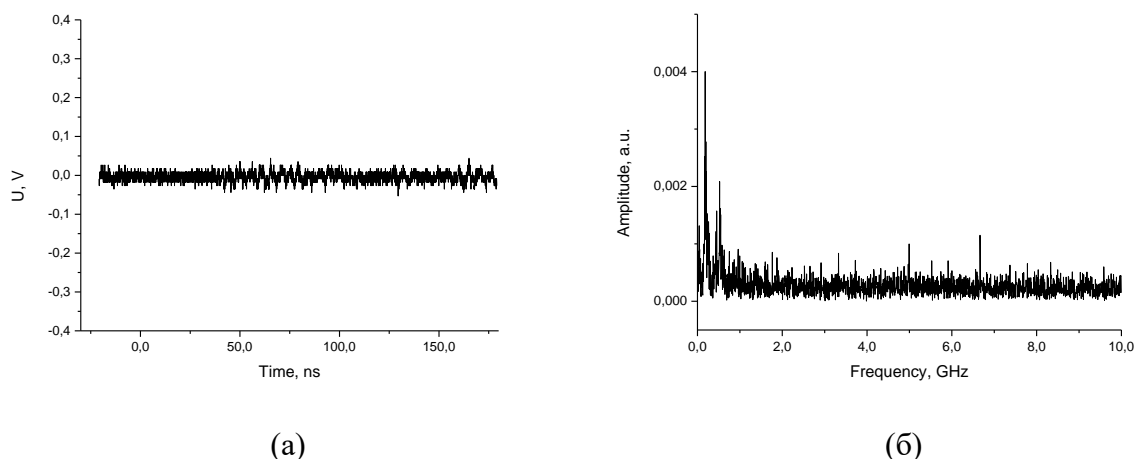


Рис. 2.8 (а) – пример полученного с антенны сигнала, в отсутствие протекания основного тока разряда; (б) – спектр этого сигнала

В эксперименте с высоковольтным разрядом в промежутке игла-плоскость длиной 5 мм с типичной вольт-амперной характеристикой, показанной на рис. 2.7, с помощью разработанной АВ обнаружена генерация ВЧ-радиоизлучения. Пример регистрируемых радиосигналов представлен на рис. 2.9. Амплитудный спектр радиосигнала, полученный при помощи быстрого Фурье преобразования (FFT) представлен на рис. 2.10 а.

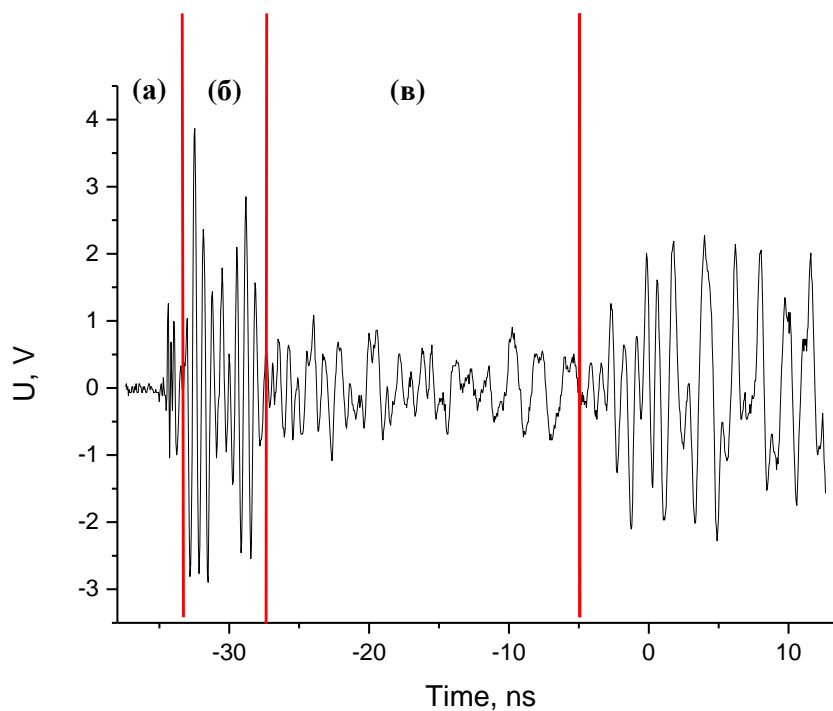


Рис. 2.9 Пример полученного с антенны сигнала: (а) – предпробойная стадия, (б) – стадия пробоя, (в) – стадия протекания основного тока разряда

В полученном сигнале можно выделить три характерные временные зоны, соответствующие разным стадиям развития разряда в исследуемом промежутке. Первая зона – предпробойная стадия (до начала резкого роста тока), характеризуется приложенным высоким напряжением. В этой стадии в ходе взрывной эмиссии появляются лавины электронов и формируются стримеры. Развиваясь, они начинают ионизовать среду по пути своего прохождения. В этой стадии можно наблюдать всплеск наиболее высокочастотной составляющей спектра радиоизлучения (до 6 ГГц, см. рис. 2.10 б). Вторая зона характеризуется падением напряжения и ростом тока – это стадия развития сильноионизованной искры [39], после момента электрического пробоя промежутка. Спектр радиоизлучения на этой стадии разряда представлен на рис. 2.10 в. Амплитуда сигнала возрастает, в сравнении с предпробойной стадией, при этом основной вклад вносит высокочастотное излучение на частотах 1,4–1,8 ГГц, что говорит о

сложности процессов формирования результирующей искры. Процессы плазмообразования начинают включать в себя помимо ионизации среды лавинами электронов, быстрое нарастание проводимости в растущем канале, состоящем из сильноионизованных филаментов [39]. Третья зона – это стадия протекания основного тока разряда, когда электроды соединены результирующим искровым каналом. Характеризуется высокой интенсивностью излучения в диапазоне 200 – 500 МГц, спектр этой зоны представлен на рис. 2.10 г. Возможно, это связано с плазменными колебаниями в сильноионизованной искре.

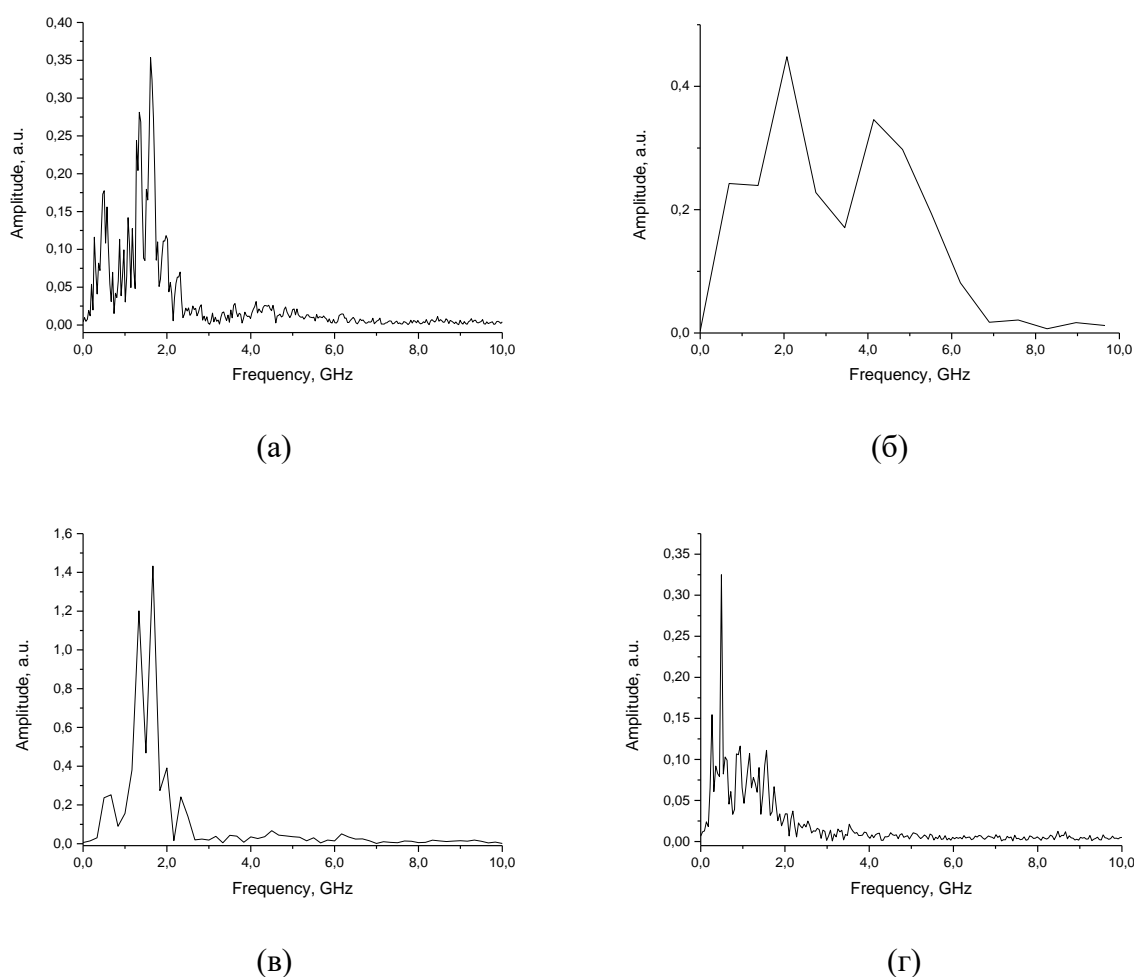


Рис. 2.10 Спектры радиоизлучения: (а) – общий спектр всего разряда, (б) – первая зона, (в) – вторая зона, (г) – третья зона



## 2.5 Второе поколение антенн

В процессе анализа результатов, представленных в предыдущем разделе, стало понятно, что разработанные мною антенны открывают возможность для исследования целого пласта физических явлений, но антенны не лишены недостатков. Видно, что более 90% излучения приходится на частоты до 2ГГц, а верхний предел чувствительности можно ограничить 6ГГц. Использованный материал FR-4 имеет существенный недостаток – тангенс угла диэлектрических потерь в нём достигает 0,02.

Недостаток в виде сравнительно небольшого усиления (менее 10 дБ) можно компенсировать установкой антенны на расстоянии 3-5 метров от разряда. Это позволит находиться уже в «дальней зоне» Френеля, при этом мощность радиоизлучения останется достаточной для его регистрации этим типом антенн.

Моделирование параметров антенны производилось в CST Microwave Studio 2017 в Гексогональной матрице с заданным параметром точности - 50 dB. Плотность ячеек составляет 10 шт. на длину волны во всем диапазоне частот. Так же для повышения точности, особенно это касается частот ниже 2 ГГц, была активна функция адаптивного улучшения сетки с допуском на отклонение в 2% между итерациями. Общее количество ячеек сетки достигает 23`799`168.

Финальные геометрические параметры антенны получены из статистического анализа результатов моделирования с вариацией этих параметров – выбраны параметры, позволяющие достигнуть максимально возможных параметров чувствительности антенны в нижней части её полосы частот.

Формула дальней зоны дифракции Фраунгофера  $R \geq 2D^2/\lambda$ , где  $D$  – геометрический размер антенны,  $\lambda$  – длина волны. Для 2 ГГц – это 1,2 м.

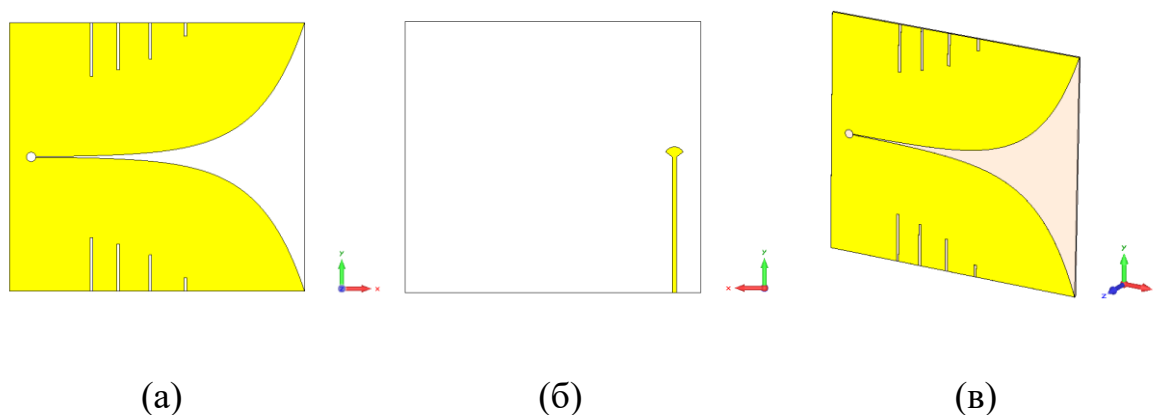


Рис. 2.11 Вид расчетной модели антенны: (а) – «лицевая» сторона с рабочей зоной и резонатором; (б) – «оборотная» сторона с микрополосковой линией (в) – изометрия

Таблица 2.2. 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

Конструктивно антенны выполнены в виде медных печатных проводников на композите марки Rogers 4003С толщиной 1,52 мм. Материал обладает коэффициентом диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 3,48$  (измерено на 10 ГГц), а также хорошими прочностными и стоимостными характеристиками. Толщина медного слоя с каждой стороны составляет 18 мкм. Отдельным плюсом стоит отметить тангенс угла диэлектрических потерь, который достигает значения 0,0027 на частотах порядка 10 ГГц и

выше. Потери в диэлектрике учитываются при моделировании и расчете антенны (см. рис.2.11), и с их учётом мы получаем характеристики антенны, удовлетворяющие требованиям проводимых экспериментов. Вырезы в боковой части лицевой стороны антенны служат для ограничения токов, бегущих по краю рамки [40]. Благодаря чему происходит перенаправление этих токов вдоль раскрыва (щели) антенны, немного увеличивая КУ антенны (на ~10%).

Использовался кабель марки SF-141 длиной до 10 м. Его характеристики, заявленные производителем, позволяют сделать оценку сверху для потерь в кабеле в диапазоне рабочих частот антенны в 2,8–5,9 дБ. Потери в диэлектрике не превышают 1–2 дБ в диапазоне регистрируемых частот (величина получена моделированием, см. рис. 2.12).

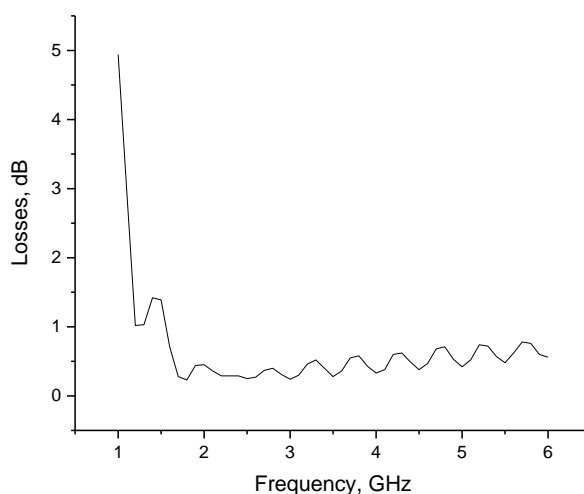


Рис. 2.12. Потери, рассчитанные по данным полученным при моделировании, как КНД–КУ антенны

Коэффициент стоячей волны по напряжению (**КСВН**) определяется как отношение между переданными и отраженными стоячими волнами напряжения в радиочастотной (РЧ) электрической передаче. Это мера того,

насколько эффективно ВЧ-мощность передается от источника питания через линию передачи в нагрузку.

Для лабораторных исследований в качестве приемной антенны нам достаточно иметь КСВН меньше 3 [41]. Используемая антенна удовлетворяет этому критерию с 1,16 ГГц и выше. КСВН в диапазоне не превышающим 2 антенна имеет в диапазоне частот 1,6 – 9,7 ГГц

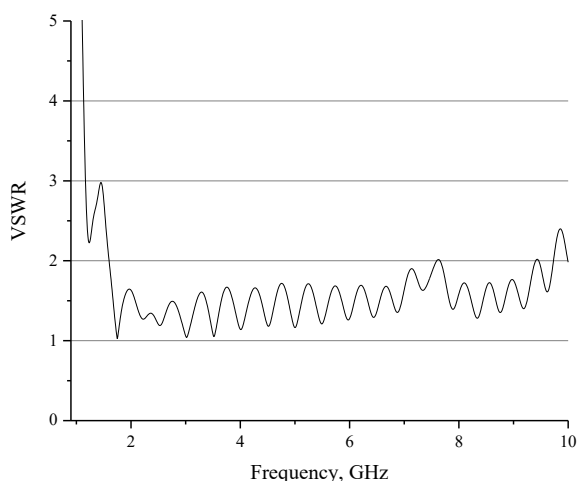


Рис. 2.13 Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН)

Коэффициентом усиления (**КУ**) антенны называют отношение мощности на входе у эталонной изотропной антенны к мощности исследуемой антенны, если при помощи этих антенн в избранном направлении на одинаковом расстоянии они создают одинаковые величины напряженности поля или плотности потока мощности.

Диаграмма направленности (см. рис. 2.15) имеет один лепесток на частотах до 3,8 ГГц, раздваивающийся на более высоких частотах. С 5,5 ГГц между ними появляется третий лепесток, имеющий большее усиление.

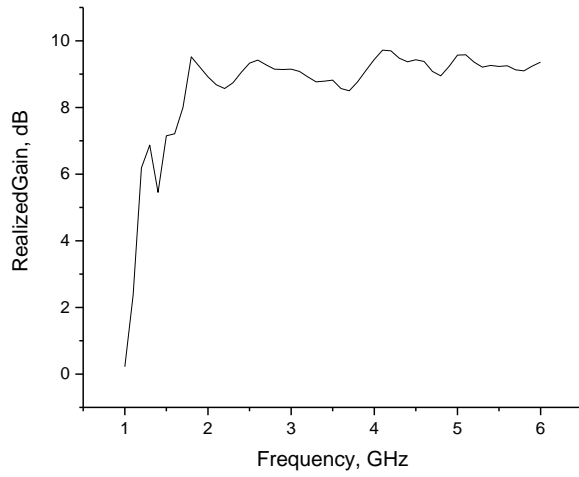


Рис. 2.14 Коэффициент усиления антенны (выше 8 dB на частотах выше 1,6 ГГц).

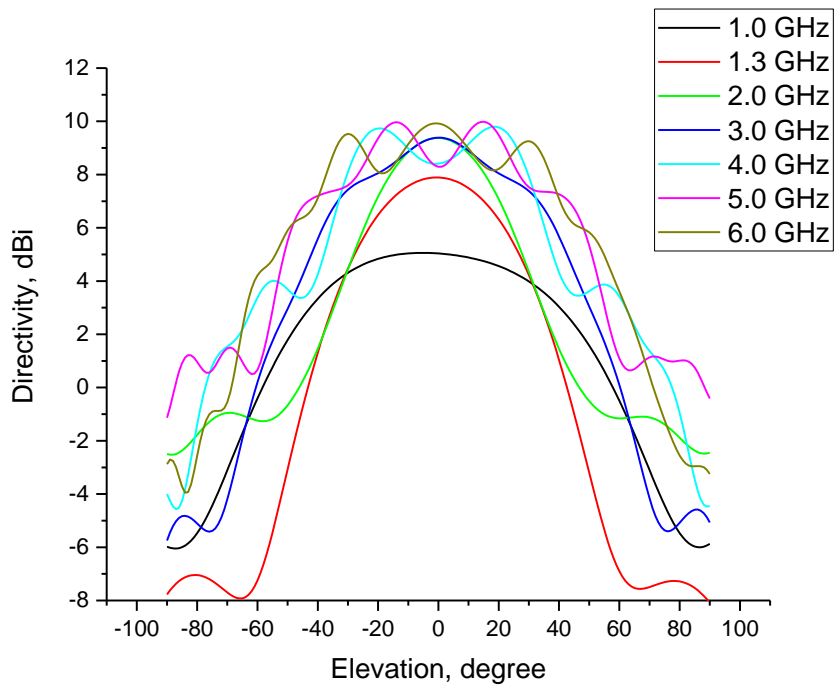


Рис. 2.15 Диаграммы направленности в зависимости от частоты

## 2.6 Апробация результатов

Исследования проводились с использованием небольшого кабельного генератора импульсов напряжения, см. рис. 2.16(a). Генератор включал с себя формирующую линию – отрезок кабеля РК-75-9-11 длиной примерно 2 м (импеданс 75 Ом), заряжаемую до 50 кВ (отрицательная полярность) от источника постоянного напряжения через балластное сопротивление (1 ГОм). Формирующая линия стыковалась с управляемым разрядником (ключ) и согласованной передающей линией длиной 1 м. На конце передающей линии размещался катодный узел, к центральной жиле которого была припаяна высокоомная часть резистивного делителя напряжения. Вблизи данного крепления располагался острый катод с малым радиусом скругления вершины. Напротив катода был установлен анод цилиндрической формы, торец которого имел диаметр 10 мм. Анод был установлен на токовый шунт (детектор тока), который замыкался на земляную часть катодного узла через четыре металлических стержня, расставленных на некотором расстоянии относительно области с разрядным промежутком. Расстояние от вершины катода до анода в экспериментах составляло  $\approx 2$  мм. Разрядной средой служил воздух при атмосферном давлении. При срабатывании ключа формирующая линия выдавала высоковольтный импульс амплитудой до 25 кВ, фронтом  $\approx 4$  нс, длительностью импульса порядка 40 нс. Данный импульс подавался на разрядный промежуток и инициировал в нём разряд. Предельный ток разряда достигал величины порядка 300 А. Развитие разряда в промежутке сопровождалось генерацией плазмы, а также эмиссией сверхвысокочастотного радиоизлучения. Для его регистрации в дальней зоне (на расстоянии нескольких метров от промежутка) устанавливалась сверхширокополосная антенна Вивальди (рабочий диапазон более 1 ГГц). Сигналы с антенны, детекторов напряжения

и тока разряда (оба с разрешением не хуже 1 нс) записывались цифровым осциллографом (6 ГГц, 20 Гвыб/сек). При синхронизации сигналов детекторов учитывались все геометрические задержки и задержки в кабельных трактах.

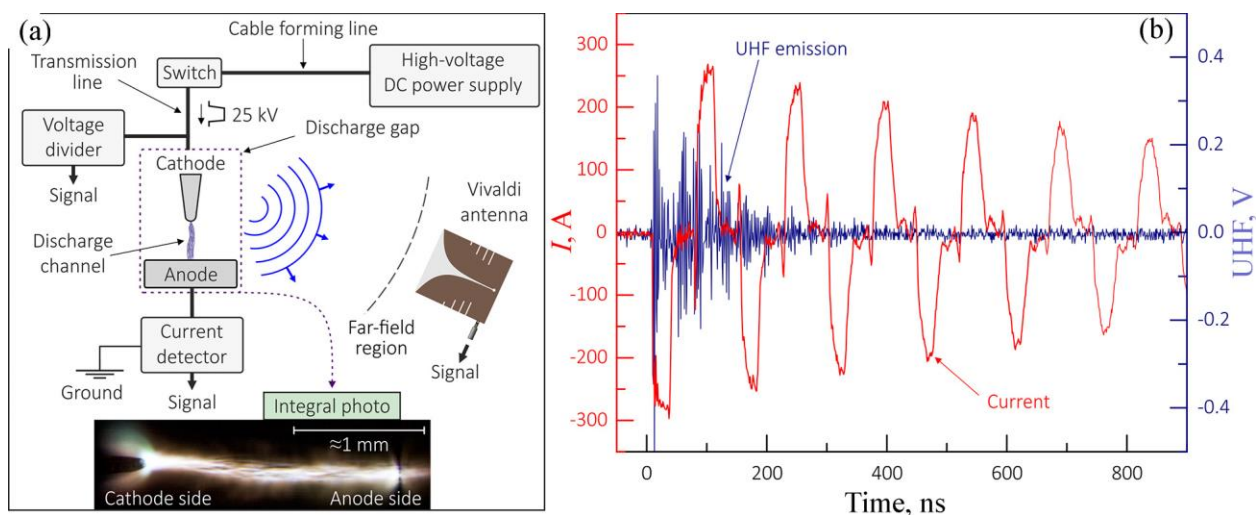


Рис. 2.16: Блок-схема эксперимента (а). Типичные сигналы СВЧ-излучения и тока через разрядный промежуток (б).

Чтобы убедиться в том, что регистрируемое СВЧ-излучение исходит только от рассматриваемого разрядного промежутка, а не от промежуточного управляемого разрядника и источника питания, были проведены калибровочные эксперименты. Измерялись все возможные наводки и шумы при работе кабельного генератора в режиме закороченной нагрузки (искровой промежуток на рис. 2.16(а) закорачивался на землю массивным металлическим стержнем) и без нагрузки (полностью извлекался анодный узел). В результате было уточнено, что уровень шумов от высоковольтной установки на два порядка ниже характерных амплитуд сигналов СВЧ-излучения, наблюдаемых во время инициирования искры в исследуемом промежутке. При этом никакой эмиссии СВЧ излучения от выходной части установки в отмеченных режимах работы генератора не наблюдалось.

При разрядке кабельного генератора на разрядный промежуток последний пробивался спустя некоторое время, и через него начинал протекать ток. Поскольку при пробое разрядный промежуток оказывался закороченным на землю, подаваемый высоковольтный импульс отражался от разрядного промежутка с инвертированной амплитудой и распространялся далее в тракте “передающая линия – формирующая линия”. Отраженный импульс частично терял в своей амплитуде ввиду затухания в линии и потерь из-за сопротивления плазмы в области с управляемым разрядником и разрядным промежутком. Доходя до балластного сопротивления на выходе высоковольтного источника, высоковольтный импульс отражался без инвертирования своей амплитуды и вновь поступал на закороченный разрядный промежуток, вследствие чего наблюдалось протекание тока через промежуток с полярностью обратной той, которая была при токе от самого первого подаваемого импульса. Описанный процесс распространения высоковольтного импульса, будучи периодическим, имел затухающий характер в масштабе времени порядка 1 мкс, см. рис. 2.16(b). Примечательно, что генерация СВЧ-излучения (в диапазоне 1–6 ГГц) наблюдалась в течение первых нескольких актов подачи высоковольтного импульса на разрядный промежуток и протекании через него тока, а также в интервалах времени между ними, когда многократно отраженный импульс еще не достигал промежутка. Эмиссия СВЧ-излучения также носила затухающий характер, но более быстрый. Генерация СВЧ-излучения не наблюдалась уже после третьего – четвертого акта прихода многократно отраженного импульса. При этом максимальная амплитуда сигналов СВЧ-излучения достигалась, как правило, в пределах только первого акта подачи высоковольтного импульса.



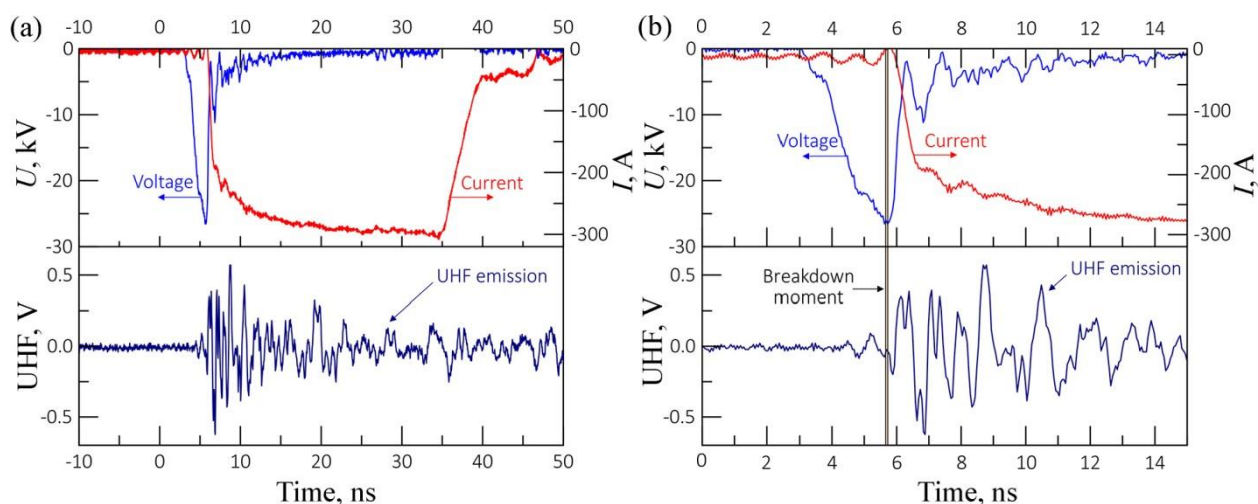


Рис. 2.17: Сигналы напряжения, тока разряда и СВЧ-излучения в первом импульсе на рис. 1(b) на масштабе времени 60 нс (a) и 15 нс (b).

На рис. 2.17 (a) и (b) представлены сигналы СВЧ-излучения, напряжения и тока разряда во время подачи самого первого высоковольтного импульса на разрядный промежуток. Из рис. 2.17 (b) видно, что на развитие пробоя промежутка, сопровождающегося синхронным резким ростом тока и спадом напряжения, уходит  $\approx 3$  нс.

Пробой происходит при напряжении  $\approx 25$  кВ. Эффект удвоения амплитуды импульса напряжения не успевает развиваться. Примечательно, что по мере приближения момента пробоя промежутка скорость роста фронта напряжения меняется, что совпадает по времени с появлением слабого предимпульса СВЧ-излучения. Амплитуда предимпульса постепенно нарастает за  $\approx 1$  нс. Момент наступления пробоя промежутка сопровождается резким ростом амплитуды сигналов СВЧ-излучения, которая держится на высоком уровне в течение последующих  $\approx 10$ – $20$  нс.

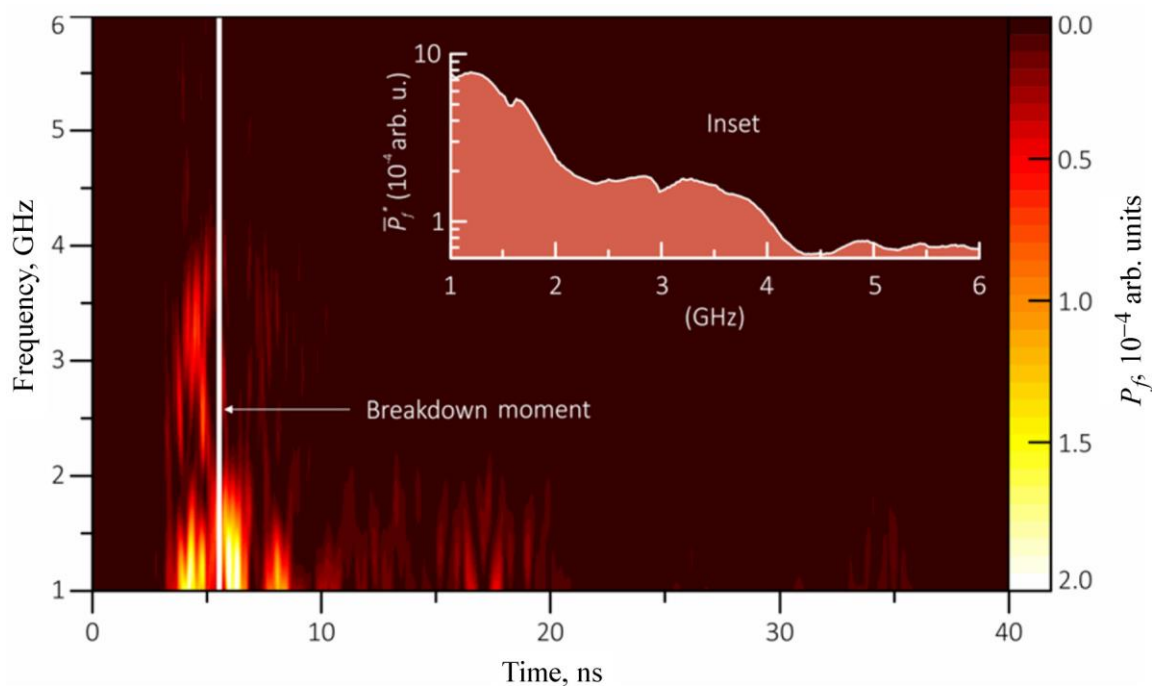


Рис. 2.18: Спектрально-временная карта мгновенной мощности СВЧ-сигнала, приведенного на рис. 2.17. Вставка к рисунку демонстрирует усредненное по многим событиям распределение максимальной мощности вспышки СВЧ-излучения по частоте.

Хотя всё регистрируемое СВЧ-излучение характеризуется частотами в диапазоне 1–6 ГГц, значения мгновенной мощности излучения (квадрат амплитуды сигнала) на данных частотах распределены крайне неоднородно по времени и частоте. Наибольшая мощность СВЧ-излучения на высоких частотах (более 2 ГГц) достигается в первые несколько наносекунд после момента пробоя промежутка, а также на стадии предимпульса эмиссии СВЧ-излучения. В данных интервалах времени наблюдаются спектральные компоненты осцилляций сигнала вплоть до 6 ГГц. После наступления пробоя, несмотря на то что амплитуда СВЧ-сигнала резко возрастает и держится значительной в течение последующих 10–20 нс, основная мощность осцилляций сигнала сосредоточена лишь в интервале 1–2 ГГц. Заметим также, что в самом сигнале СВЧ излучения прослеживаются

осцилляции с частотой чуть ниже 1 ГГц, которые попадают в диапазон чувствительности используемой антенны. При построении карты на рис. 2.18 была использована локальная информация о сигнале только при рассмотрении интервалов времени длительностью 1 нс, что ограничивает её содержимое снизу на частоте 1 ГГц.

## 2.7 Результаты 2 главы

Во второй главе предложен расчет, моделирование и разработка сверхширокополосной антенны с расширяющейся щелью для применения в экспериментах по регистрации радиоизлучения, генерирующегося в начальной фазе искрового разряда. Изготовлена антенна-прототип с рабочим диапазоном частот 1,66 – 9,36 ГГц с КСВН не превышающим 2,0. Приведены результаты использования антенны 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 отличии 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 10ГГц с КСВН не превышающим 3,0, коэффициент усиления (КУ) выше 8 дВ на частотах выше 1,6 ГГц.

## Глава 3. Локализация источника радиоизлучения искрового разряда.

### 3.1 Описание установки ЭРГ

Антенны, описанные в предыдущей главе, применялись для исследования генерации радиоизлучения на установке ЭРГ, устройство и работа которой подробно представлены в этой главе. На установке ЭРГ выполняются эксперименты по пробое длинных воздушных промежутков (Рис. 3.1). На установке используются некоторые составные части ускорителя, модифицированные под требования эксперимента.

В качестве источника напряжения использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) установки ЭРГ. ГИН собран по схеме Аркадьева–Маркса и состоит из 15 пар конденсаторов ИК-100-0,4 (полная запасаемая энергия 60 кДж). В качестве коммутирующих элементов применена колонна разрядников, расположенная горизонтально.

ГИН расположен в герметичном цилиндрическом корпусе диаметром 2 м и залит трансформаторным маслом.

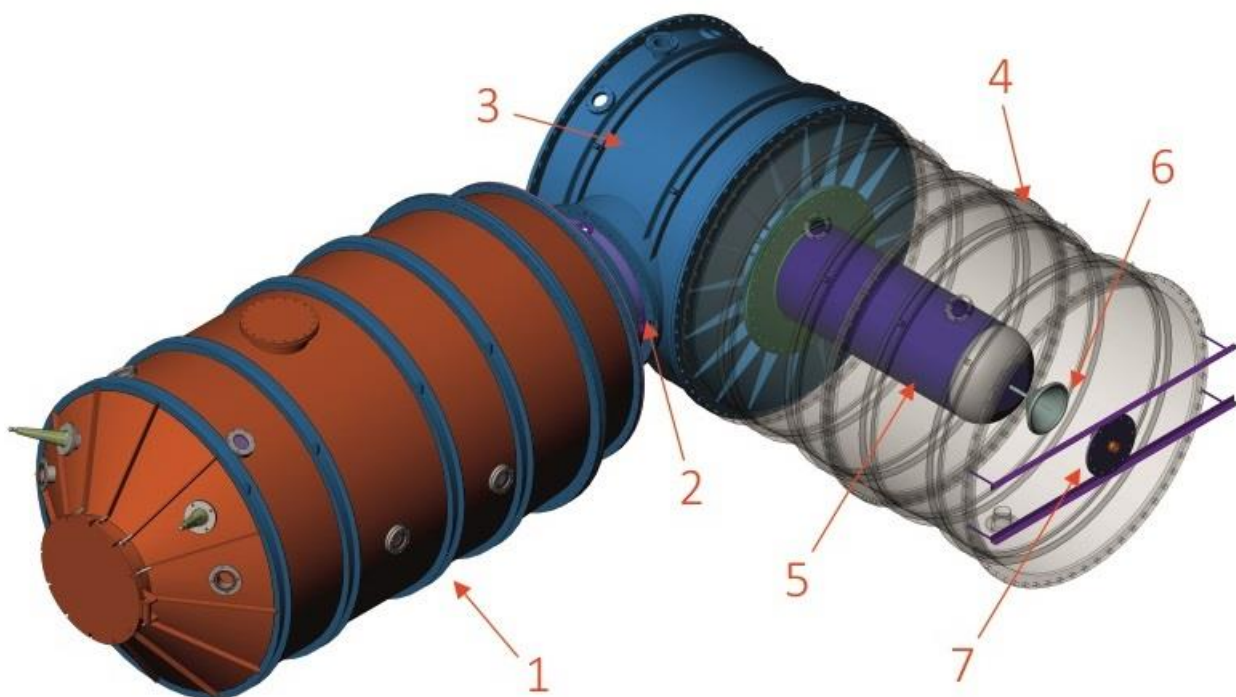


Рис. 3.1 Схема экспериментальной установки ЭРГ: 1 – маслонаполненный ГИН Аркадьева–Маркса, 2 переходная секция, 3 – секция изолятора, 4 – обечайки воздушной секции (показаны прозрачными), 5 – проходной изолятор масло–воздух, 6 – катодная электродная система, 7 – анодная электродная система, 8 – основной разрядный промежуток.

Узел нагрузки ГИН с проходным масловоздушным изолятором и выравнивающими сопротивлениями сконструирован защищенным от пробоев по поверхности вплоть до 3 МВ. Электродная система является аксиально-симметричной, с диаметром внешнего заземленного токопровода 2 м. Катодный электрод разрядного промежутка выполнен в виде дюралевого колпака, имеющего плоскую приосевую зону диаметром 320 мм и закругление периферийной части с  $R = 20$  мм. На фланец, закрывающий приосевую зону, устанавливался выносной шток с иглой на конце. Анодный электрод размещен во фланце на оси системы, имеющем цанговый зажим для плавного изменения зазора за счет перемещения трубчатого штока. В качестве наконечника применяется тот же набор сменных электродов, что и

для катода. Электродная система и распределение электрического поля для этой системы изображены на Рис. 3.2.

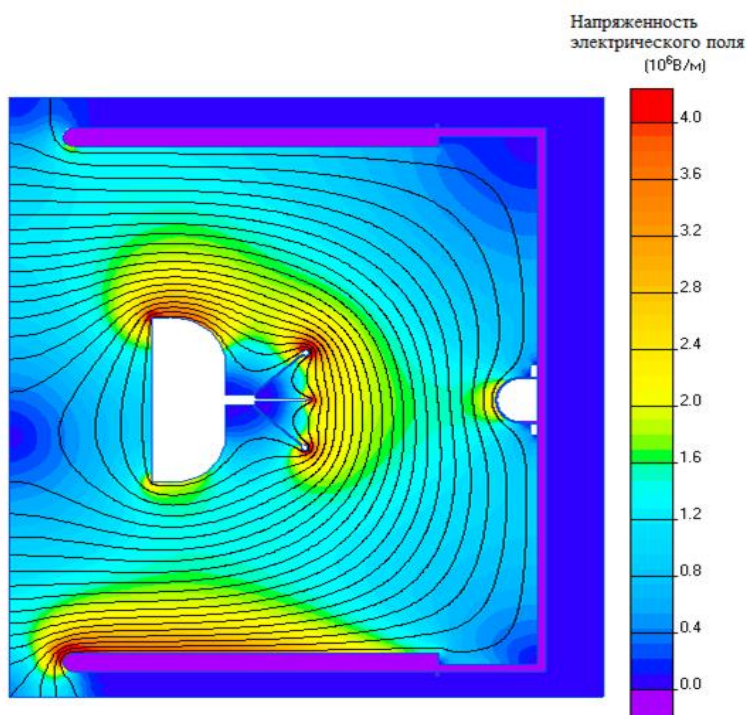


Рис. 3.2 Расчет распределения напряженности электрического поля в зазоре при  $U = 1$  МВ. Между изолиниями потенциала – 50 кВ.

### 3.2 Локализация источника радиоизлучения двумя антеннами

В предположении о том, что источник радиоизлучения находится в горизонтальной плоскости, проходящей через ось исследуемого разряда, было оценено местоположение источника радиоизлучения методом триангуляции при помощи двух приемных антенн, подробно описанных в разделе 2.2 настоящей работы. Полученный с антенн сигнал регистрируется осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 ГГц. Частота дискретизации осциллографа позволяет сравнивать задержку между двумя каналами с точностью в 50 пс. В зависимости от области генерации излучения и местоположения приёмных антенн в плоскости разряда погрешность измерений местоположения источника радиоизлучения

меняется от 10 до почти 30 см. Принципиальная работоспособность применяемого метода проверена в эксперименте, в результате которого были получены распределения местоположения источников высокочастотного радиоизлучения (рис. 3.3).

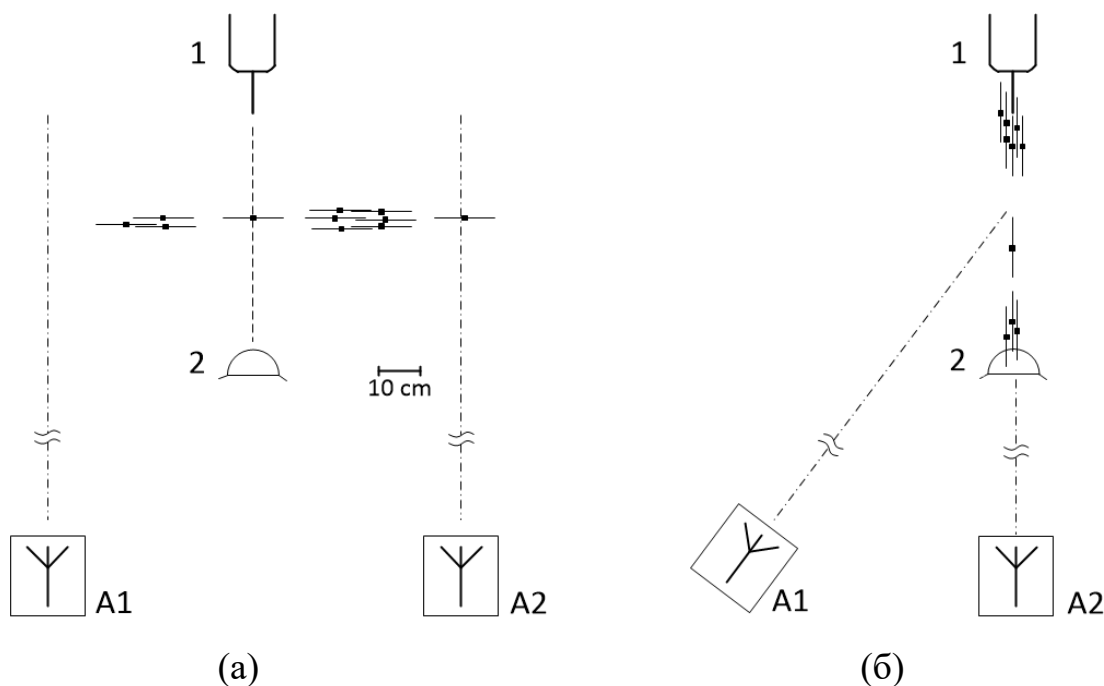


Рис. 3.3 Распределение источников радиоизлучения (а) – в первой конфигурации, (б) – во второй конфигурации. 1 – катод, 2 – анод, A1, A2 – антенны.

В первой конфигурации антенны A1, A2 расположены симметрично относительно оси разряда на расстоянии 4.7 м от анода, расстояние между антеннами составляет 1 м (рис. 3.3 а). На этом расстоянии они находятся в «дальней зоне» на всей полосе регистрируемых частот. Антенны ориентированы на середину разрядного промежутка. Данная конфигурация позволяет оценить расположение источника радиоизлучения по координате, перпендикулярной оси разряда с погрешностью 10–15 см, пренебрегая координатой вдоль оси разряда (рис. 3.3 а).

Во второй конфигурации антенна A1 расположена на расстоянии 1 м от антенны A2, размещенной на оси разряда на расстоянии 4.7 м от анода



(рис. 3.3 б), при этом обе антенны ориентированы в область разрядного промежутка. Данное расположение антенн, напротив, позволяет оценить расположение источника радиоизлучения по оси разряда, пренебрегая поперечной координатой. Погрешность измерений обусловлена, в первую очередь, малым углом между антеннами. Результаты сгруппированы по трем областям разряда – вблизи катода, вблизи анода и в центре промежутка. Полученное распределение представлено на рис. 3.3 б. Как правило, источник радиоизлучения находится вблизи электродов, на расстоянии 5–10 см.

Наиболее высокочастотная составляющая радиоизлучения приходится на стадию роста напряжения в разрядном промежутке. Формирующиеся на этой стадии первичные подкритические электронные лавины начинают ионизовать среду по пути своего прохождения. С нарастанием напряженности поля и накоплением пространственного заряда в приэлектродной области формируются и затем прорастают стримеры, из которых в последствии при росте локальной проводимости и их эволюции в разрядном промежутке формируется лидер разряда [42-44]. Отметим, что при переходе к стримерно-лидерной стадии амплитуда радиоизлучения резко возрастает (см. рис. 3.4), но уменьшается вклад излучения с частотой более 2 ГГц. Поэтому источники радиоизлучения методом триангуляции можно локализовать по первому регистрируемому импульсу отдельно на стадии электронных лавин и на стадии формирования стримеров.

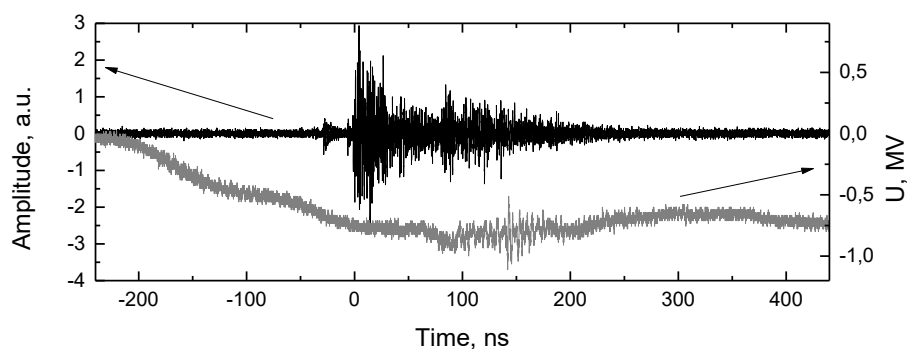


Рис. 3.4 Типичный сигнал, принимаемый антенной (слева, черный), импульс напряжения, приложенный к разрядному промежутку с ГИН (справа, серый).

Для уточнения результатов и получения лучшего пространственного разрешения поставлена серия экспериментов, насчитывающая 115 событий (см. рис. 3.5). Антенны ориентированы на середину разрядного промежутка, и находятся от него на расстоянии в 1,6 м (A1) и 2,7 м (A2). Обработка зарегистрированных импульсов проверена в предположении, что источники радиоизлучения находятся либо в горизонтальной плоскости разряда, либо на внутренней поверхности цилиндра обратного токопровода (обечайки). В 57% зарегистрированных событий наблюдалось отчетливое разделение высокочастотного радиоизлучения на два типа: первый – на стадии ионизации промежутка электронными лавинами (рис. 3.5 а), второй – на стадии формирования и развития стримеров (рис. 3.5 б). Погрешность измерений обусловлена факторами, описанными выше, и меняется от 5,5 до 11 см, в зависимости от области генерации радиоизлучения. Также присутствует погрешность метода измерений, выражающаяся в возможной генерации радиоизлучения вне исследуемой плоскости разряда.

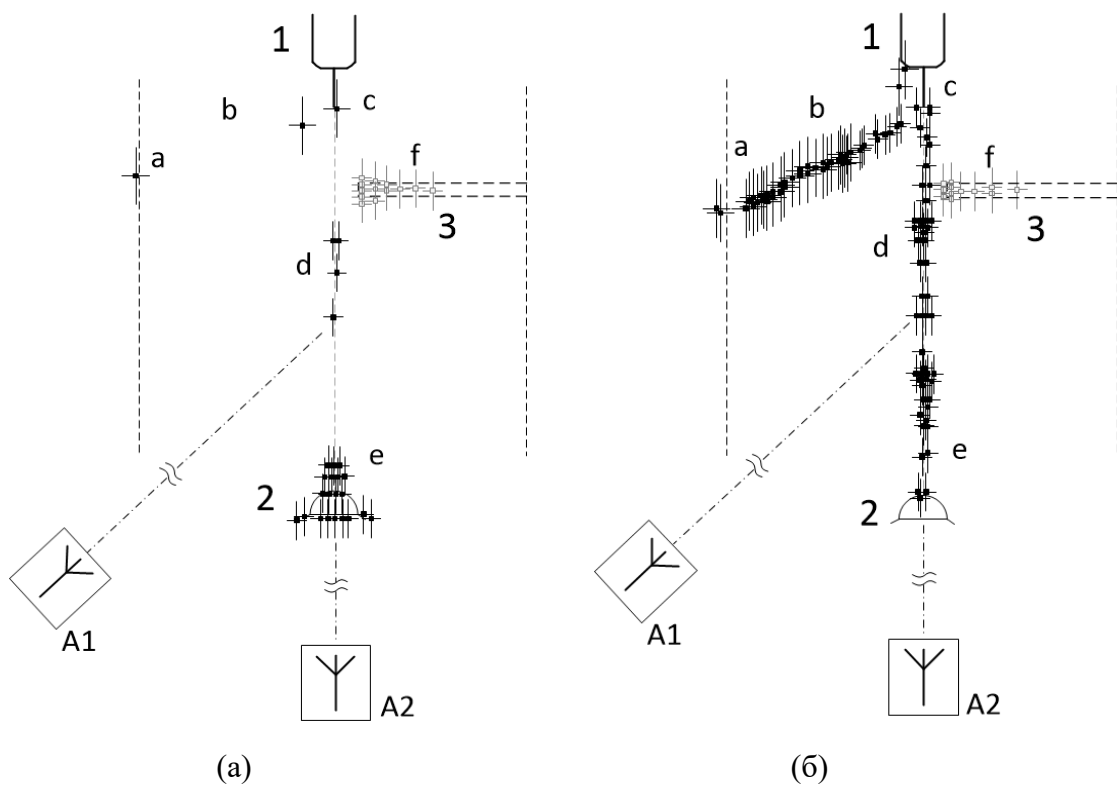


Рис. 3.5 Расположение источников радиоизлучения в первом импульсе (а) – на стадии развития лавин электронов, (б) – на стадии формирования стримеров. 1 – катод, 2 – анод, 3 – торцевой фланец обечайки, А1, А2 – антенны а-ф – области генерации излучения (подробнее в табл. 1).

Источники высокочастотного радиоизлучения можно сгруппировать по различным областям генерации (а–f, см табл. 3.1). Отмечено, что излучение, регистрируемое на стадии развития электронных лавин, обычно генерируется (73 из 80 случаев) на анодной полусфере и в области торцевого фланца обечайки. Под каждым событием мы имеем в виду радиоизлучение отдельного, нового разряда в идентичных условиях. На стадии формирования и развития стримеров радиоизлучение наблюдается в основном в разрядном промежутке на расстоянии 10-15 см от электродов, а не вблизи их поверхности. Часть событий исключена из выборки по причине отсутствия однозначного соответствия между импульсами, регистрируемыми антеннами

A1 и A2 (наложения, множественная генерация, малое соотношение сигнал/шум).

Таблица 3.1

Классификация источников радиоизлучения по 115 разрядам

Области локализации импульсов радиоизлучения		Лавинная стадия, кол-во событий	Стримерная стадия, кол-во событий
a	Вблизи обратного токопровода (обечайкой)	1	18
b	Между обечайкой и катодом	1	22
c	Прикатодная область (игла)	1	9
d	Разрядный промежуток игла-полусфера	4	40
e	Прианодная область (полусфера)	52	5
f	Правая часть торцевого фланца обечайки	21	12
Исключены из выборки		35	9

### 3.3 Группировка излучений искрового разряда

На рис. 3.6 представлены примеры сигналов, принимаемых антенной. Видно, что радиоизлучение СВЧ диапазона генерируется в виде нескольких всплесков импульсов на стадии, когда напряжение на разрядном промежутке достигает максимальных значений. Времена генерации каждой из всплесков можно связать с соответствующими временами импульсов рентгеновского излучения, что может говорить о взаимосвязи процессов их генерации. Отмечено, что максимальной амплитудой в подавляющем большинстве случаев обладает СВЧ излучение, регистрируемое спустя 200 нс с момента приложения напряжения к разрядному промежутку. Это хорошо согласуется с результатами, представленными в [6], где авторы отмечают, что максимум мощности регистрируемого ими радиоизлучения совпадает с моментом генерации рентгеновского излучения.

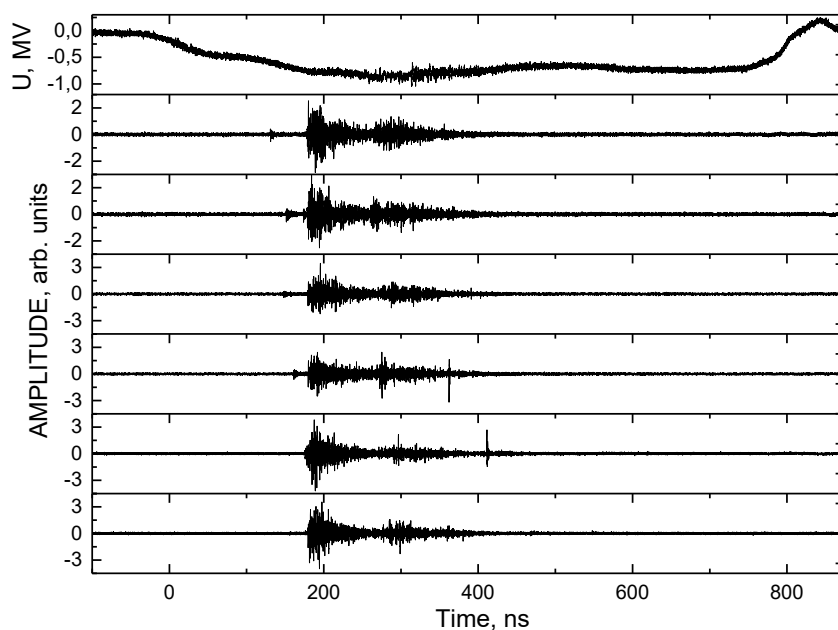


Рис. 3.6 Вверху – импульс напряжения, приложенного к разрядному промежутку, ниже – осциллограммы радиоизлучения, регистрируемого антенной.

За нулевой момент времени (триггер) в данном разделе принят момент приложения импульса высокого напряжения к разрядному промежутку.

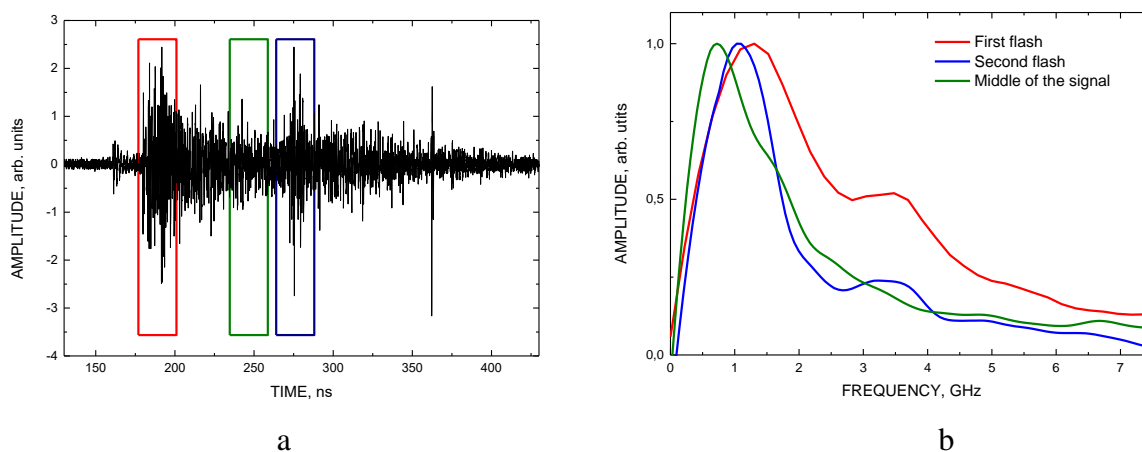


Рис. 3.7 а – импульсы радиоизлучения, регистрируемые антенной, б – нормированный на единицу сглаженный амплитудный спектр соответствующих импульсов.

На рисунке 3.7 б представлен нормированный на единицу и сглаженный спектр вспышек радиоизлучения. Красной линии соответствует спектр первого выраженного всплеска (см. рис. 3.7 а), зеленой линии – спектр сигнала в области между всплесками излучения, синей линии – спектр второй вспышки излучения, наблюдаемой спустя 70-100 нс после первой. Вклад излучения с частотой выше 2 ГГц наблюдается наиболее явно во вспышках излучения и спадает до уровня шумов между ними. Пик излучения с частотами 1,5-1,7 ГГц может быть объяснен процессами затухания стримеров, при их столкновении, т.к. совпадают по длительности с временами этих процессов, предсказанных моделированием [4,7,8,14]. Важно отметить, что мощность излучения на частотах в десятки и сотни МГц примерно на порядок превышает мощность излучения на частотах выше 1 ГГц. В совокупности с тем, что регистрирующая антенна имеет слабую, но в то же время не нулевую чувствительность в области 500 МГц (КСВ около 10), это дает существенный вклад в спектр излучения разряда, зафиксированный антенной, что соответствует максимуму спектра сигнала между вспышками излучения (зеленая линия, рис. 3.7 б).

Отмечается, что группы импульсов радиоизлучения коррелируют по времени с регистрацией вспышек рентгеновского излучения сцинтилляционными детекторами. Наложение сигналов полученным по 6 выстрелам приведено на рисунке 3.8. Более подробно корреляция радио и рентгеновского излучений рассмотрена в главе 4.

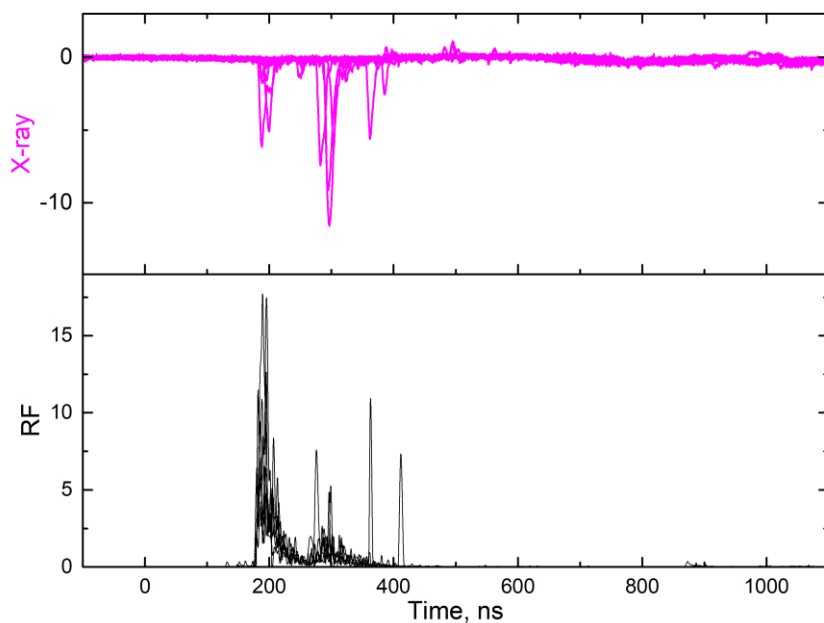


Рис. 3.8 Наложение вспышек рентгеновского и СВЧ излучения по 6 выстрелам.

### 3.4 Локализация источника радиоизлучения четырьмя антеннами

В данном разделе третьей главы рассматриваются источники интенсивного СВЧ-излучения (в диапазоне частот 1-6 ГГц), возникающие при развитии высоковольтных атмосферных разрядов. Разряды инициировались в длинном разрядном промежутке путем подачи импульса примерно 1 МВ с положительной или отрицательной полярностью. Установка ЭРГ подробно описана в разделе 3.1 данной главы. Запуск высоковольтной установки контролировался с помощью катушечного трансформатора тока, при этом его сигнал расщепляется и используется для запуска первых двух осциллографов: Tektronix MDO3104 (1 ГГц, 5 GSa/c) и Rohde&Schwarz HMO3054 (500 МГц, 2 GSa/c). Осциллограф Rohde&Schwarz, в свою очередь, выдает собственный пусковой импульс, который также был разделен для запуска осциллографа LeCroy WM8620A (6 ГГц, 20 GSa/ c) одновременно с двумя камерами закрытого типа. Осциллограф Tektronix

регистровал сигналы делителя напряжения и катушечного трансформатора тока. Осциллограф Rohde&Schwarz записал свой расщепленный пусковой импульс вместе с сигналами катушки трансформатора тока и затвора двух быстрых камер.

Осциллограф LeCroy регистрировал сигналы четырёх СШП антенн. В экспериментах мы свели к единой шкале времени (с учетом всех задержек) сигнал напряжения разряда, выходные сигналы затворов камеры и сигналы СШП антенны с временными погрешностями: не превышающими 2,5 нс относительно сигнала напряжения разряда,  $\approx 0,5$  нс для сигналов затворов камеры и  $\approx 0,5$  нс для единичного начала СВЧ-излучения. Ошибки синхронизации были вызваны дискретизацией осциллографа, шумностью сигнала, неопределенностью задержек сигнального кабеля (измеренных с погрешностью 0,1 нс) и нестабильностью фронтов импульсов запуска. Упомянутые ошибки связаны только с запуском устройства и не учитывают точность локализации источника СВЧ-излучения, которая рассматривается в отдельном разделе с обсуждаемыми результатами.



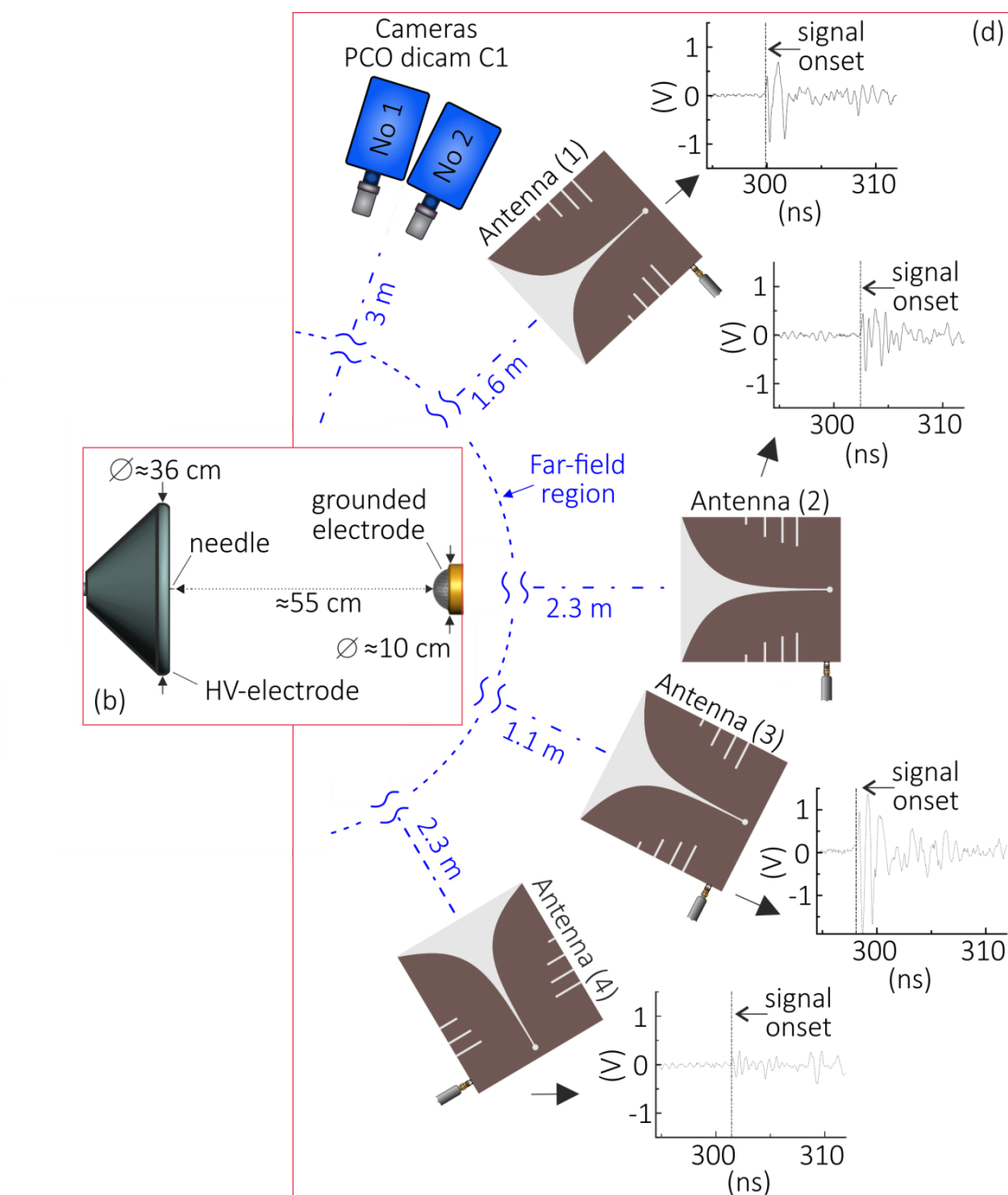


Рис.3.9 Схема радиоинтерферометрической системы

СВЧ-излучение во время высоковольтного разряда регистрировалось четырьмя идентичными компланарными Антеннами Вивальди с экспоненциальным отверстием щели, подробно описанные в разделе 2.5 данной работы. Для используемой конструкции антенны в соответствии с требованиями стандарта IEEE Сверхширокополосные (СШП) антенны были подключены к осциллографу LeCroy с помощью кабелей SF-141 FER с

низкими потерями (50 Ом, затухание не выше 1,1 дБ/м на частотах ниже 6 ГГц) длиной  $\approx 9$  м, соединенных с SMA-аттенюаторами (18 ГГц, затухание 40 дБ). Используемые антенны с линейной поляризацией были установлены на диэлектрических штативах на разных расстояниях ( $>1$  м) от центра разрядного промежутка и регистрировали сверхвысокочастотное излучение с определенными задержками. Антенны были отрегулированы таким образом, чтобы их основные лепестки диаграммы направленности были направлены в центр разрядного промежутка, а поляризация каждой антенны приблизительно совпадала с направлением оси разрядного промежутка. Положение антенны было измерено с точностью 0,5 см. При синхронизации сигналов всех устройств для сигналов СШП-антенны мы также приняли во внимание расчетную задержку ( $\approx 1,23$  нс) распространения падающей волны (70% от скорости света в вакууме) в диэлектрической подложке антенны вдоль щели до области резонатора, измеренную задержку ( $\approx 0,5$  нс) распространения волны вдоль микрополосковой линии антенны, геометрическую задержку между положениями локализованного центра источника СВЧ-излучения и входа в щель антенны, а также пространственную неопределенность при определении - изменение исходного положения.

### 3.4.1 Калибровка системы радио регистрации из четырех антенн

#### Вивальди

В ходе калибровочных экспериментов мы протестировали систему радиорегистрации, локализовав СВЧ-излучение, создаваемое компактным микроволновым генератором, выдающим импульсы напряжения амплитудой порядка 10 кВ и током менее 1 мА (см. Рис.3.10). Высоковольтная часть самодельного микроволнового генератора представляет собой диодный каскадный генератор высокого напряжения, залитый компаундом (1),

благодаря этому имеет вытянутую цилиндрическую форму. Генератор питался от 6 В литиевой батареи (2) и разряжался в искровой промежуток (4) длиной 10 мм нажатием кнопки (3). С целью уменьшения возможной неопределенности при определении положения областей излучения, искровой промежуток был размещен вблизи области с геометрическим центром (5) СВЧ-генератора (его результирующие размеры составляют  $7 \times 3,5 \times 4$  см). Все контакты генератора, соединенные проводами (6), были изолированы, а сам генератор помещен на диэлектрический стол (7) в центре исследуемого разрядного промежутка вдали от металлических электродов [45-47]. Сделано это было с целью подавить излучение диполя, которое может быть вызвано генератором на любой близлежащей металлической поверхности и исказить одиночные всплески СВЧ-излучения, используемые для решения проблемы локализации. Диэлектрический стол (7), в свою очередь, был присоединен к системе ступеней перемещения микрометрической точности. Генерация СВЧ-излучения длится около 400 нс на частотах до 6 ГГц, причем наибольшая мощность излучения достигается в полосе частот 1-2,5 ГГц.

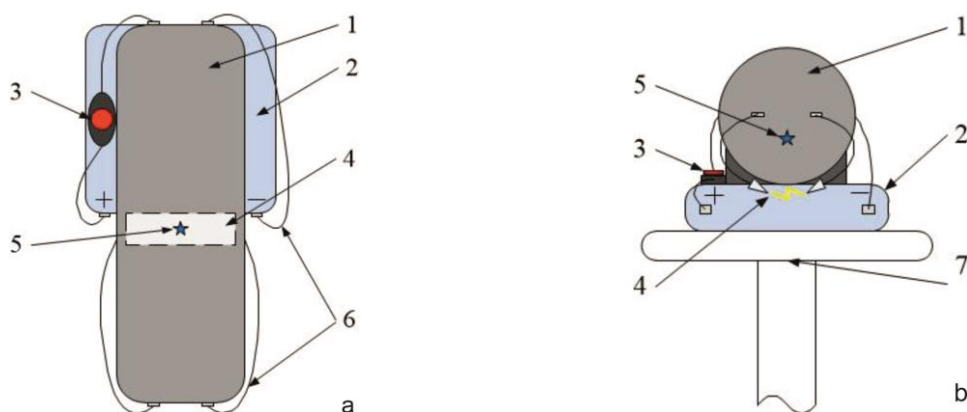


РИС. 3.10 Схематическое изображение микроволнового генератора: вид сверху (a) и сбоку (b).

Используемые антенны Вивальди, имеющие линейную поляризацию, были установлены на диэлектрических стойках на разных расстояниях в

«дальней зоне» от центра разрядного промежутка и регистрировали СВЧ-излучение с определенными задержками (см. Рис. 3.11). Антенны были отрегулированы таким образом, чтобы их основные лепестки диаграммы направленности были направлены к центру разрядного промежутка, а поляризация каждой антенны приблизительно совпадала с направлением оси разрядного промежутка. Положения антенн в пространстве были измерены с точностью 0,5 см. При синхронизации сигналов были учтены все задержки внутри каждой из антенн, а так же задержки каждого их сигнальных трактов.

Полученный с антенн сигнал регистрируется осциллографом LeCroy WM 8620A с полосой пропускания 6 ГГц и минимальным временем дискретизации 50 пс. Осциллограф помещён в экран-комнату и подключен к антеннам кабелями с низким уровнем потерь марки SF-141 FER (затухание не превышает 1,1 дБ/м на частотах ниже 6 ГГц) длиной 9 м. Сигналы СВЧ-излучения были записаны без аттенюаторов из-за их малой амплитуды. Важным качеством сигналов было то, что рассматриваемое время их нарастания между первой точкой и первым пиком самого первого пакета составляло около 100 пс, при этом увеличение амплитуды сигнала более чем на порядок превышало уровень шума. Различие амплитуд первого полупериода сигналов с антенн связано не только с расположением антенн на различном расстоянии от источника, но и, по всей видимости, с диаграммой направленности источника. При взаимной перестановке двух антенн (например 3 и 4) сохраняется эффект превышения амплитуды на антенне в положении 3 примерно в 1,5 раза относительно других антенн.

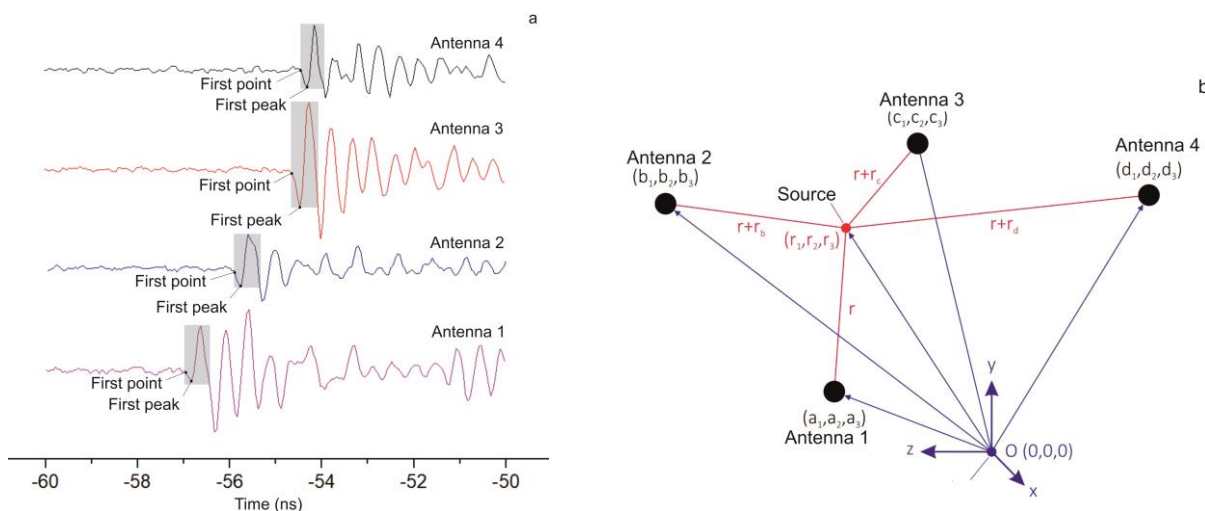


РИС. 3.11 Типичный сигнал СВЧ-излучения (а) и схема комплекса локализации (b)

Чтобы идентифицировать и локализовать одиночный всплеск в сигналах СВЧ-излучения, мы разработали специальный метод, основанный на анализе спектральных и временных характеристик сигналов, записанных параллельно. Следуя этому методу, первоначально для самой первой вспышки на кривой каждого полезного сигнала должна быть найдена первая точка выше уровня шума. Её абсолютная амплитуда принимается равной максимальной амплитуде колебаний сигнала до момента начала СВЧ-излучения (см. начало сигнала на рис. 3.11a). Начиная с первой точки, ищутся основные закономерности колебаний сигнала за период времени около 1 нс. Такие закономерности (например, полярность фронта и длительность импульса) должны коррелировать друг с другом для всех четырех сигналов, полученных с антенн.

Для определения точного положения источника СВЧ радиоизлучения решается обратная задача локализации (см. рис 3.11b). Предполагается что источник – точечный диполь (точка с координатами  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$ ), расстояние от источника до первой антенны  $r$  не известная величина. Первая антенна стоит ближе всего к источнику, следовательно, сигнал на ней всегда будет

наблюдаться раньше, чем на остальных антеннах. Тогда, зная точное положение всех четырёх антенн в заданной системе координат и относительные временные задержки между сигналами на каждой из антенн можно сказать, что задача локализации (нахождение величины  $r$ ) сводится к решению системы линейных уравнений. Решение представляет собой точку, в которой должен находиться точечный источник.

В калибровочных экспериментах были рассмотрены пять серий по 50 событий (см. рис. 3.12). Плоскость  $XZ$  это горизонтальная плоскость разрядного промежутка, исследуемого в работе [45]. Ось  $X$  представляет собой ось разрядного промежутка длиной 55 см. В каждой серии калибровочных экспериментов СВЧ-генератор имел одинаковое положение вдоль вертикальной оси  $Y$ , причем его удлиненная часть была направлена вдоль оси  $Z$ . Геометрический центр генератора перемещался в горизонтальной плоскости  $XZ$  в разные стороны на расстояние 6 см относительно центрального положения. Этих положений достаточно для проверки достоверности локализации источника в областях разрядного промежутка, где с наибольшей вероятностью локализуются плазменные СВЧ источники. Каждая точка в плоскости  $XZ$  связана с самым первым всплеском, идентифицированным в сигналах СВЧ-излучения. Для каждой серии были определены положения статистических центров локализованных источников вместе с их стандартными отклонениями вдоль основных осей координат. При апробации метода локализации мы протестировали два способа выбора точек внутри исследуемой вспышки. В первом случае мы брали точку, следующую за выходом из шума (рис.3.12а). Во втором случае бралась точка первого максимума/минимума для четырёх коррелирующих вспышек. Отдано предпочтение второму способу, так как статистически он помогает локализовать источник точнее и точки располагаются кучнее.

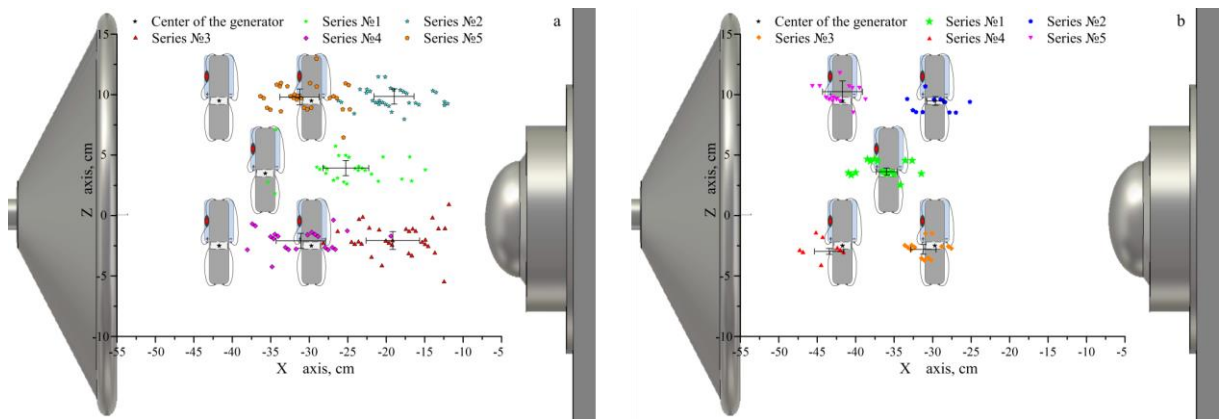


Рис.3.12 Источники СВЧ-излучения локализованные в 5 сериях по 50 событий. (а) по точке выхода из шума, без корректировки систематической ошибки (b) по точке максимума вспышки с корректировкой систематической ошибки.

На рис 3.12 видно, что даже при предварительной калибровке всех трактов сигнала (с погрешностью 100 пс) и положений (с погрешностью 0,5 см) антенн точность локализации при определении областей излучения оказывается довольно хорошей (в масштабах всей установки). 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.

Наибольший разброс положения источников наблюдается вдоль оси X. Примечательно, что во всех сериях статистические центры локализованных источников не совпадают с геометрическим центром микроволнового генератора. Каждый статистический центр удален от геометрического центра примерно на 13 см, 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 ту, которая допускалась в ходе калибровочных экспериментов.

Суть задачи учёта систематической ошибки заключается в следующем. Зная координаты  $(x, y, z)$  геометрического центра источника СВЧ-излучения (который, как показали расчеты, совпадает с геометрическим центром генератора на рис 1 и 3), координаты антенны  $(x_i, y_i, z_i)$  и относительные временные задержки  $\Delta t_{i,j}$  (где  $i, j = 1-4$ ) между сигналами, записанными в 50 событиях, могут быть найдены статистические поправки  $\sigma_{ij}$  к задержкам  $\Delta t_{ij}$ . Поправки  $\sigma_{ij}$  включают все неизвестные разбросы в трактах сигнала и координатах антенны. Математически это задача выполняется при минимизации каждого из шести выражений при помощи функции RMS стремящейся к нулю. Таким образом, мы выяснили, что для всех пяти серий эксперимента наилучшее соответствие между положениями статистических центров источников СВЧ-излучения и центром микроволнового генератора получено при  $\sigma_{12} = -40$ ,  $\sigma_{13} = -55$  и  $\sigma_{14} \approx 0$  пс. Результаты с учетом этих поправок представлены на рисунке 3.12b. Предположение о том, что наиболее вероятная область излучения совпадает с геометрическим центром микроволнового генератора, оказалось оптимальным для всех серий.

### 3.4.2 Локализация источников СВЧ излучения системой радио регистрации из четырех антенн Вивальди

На рисунках 3.13(a) и 3.13(б) показаны наложенные формы сигналов напряжения и сигналы СШП-антенны, записанные на независимых снимках для положительной и отрицательной полярности высоковольтного импульса, приложенного к исследуемому разрядному промежутку на рис. 3.9. Для этих снимков были получены изображения разрядных структур, см. рисунок 3.14 и 3.15, в разные периоды времени эволюции разряда при времени экспозиции от 55 до 68 нс и диафрагмах объектива  $f/16-f/8$ . Изображения представлены в



цветовой палитре (256 оттенков серого) и иллюстрируют характерное развитие разряда во времени и пространстве. На каждом из рисунков. 3.14 и 3.15 (верхний левый угол) представлен основной кадр разрядного промежутка, снятый без разряда, который иллюстрирует угол изображения разрядного промежутка.

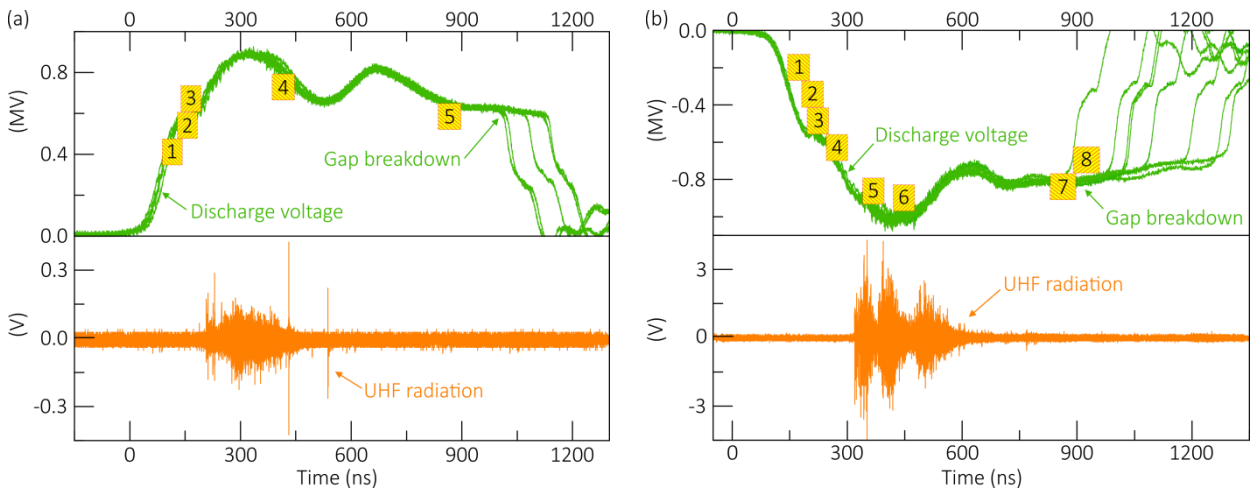


РИС. 3.13 Наложенные друг на друга формы сигналов напряжения и СВЧ-излучения, полученные на нескольких снимках для положительной (а) и отрицательной (б) полярности импульса высокого напряжения, подаваемого на исследуемый разрядный промежуток. Цифры 1-8 в форме сигнала напряжения указывают периоды времени, в течение которых происходит визуализация разряда.

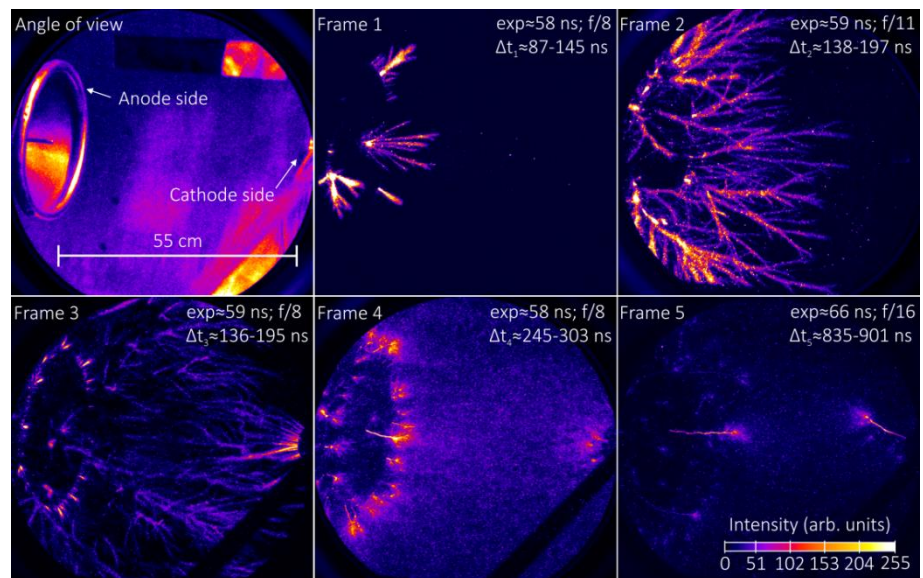


РИС. 3.14 Изображения (кадры 1-5), демонстрирующие эволюцию разряда при положительной полярности приложенного высоковольтного импульса на кадрах 1-5 на рис. 3.13(а).

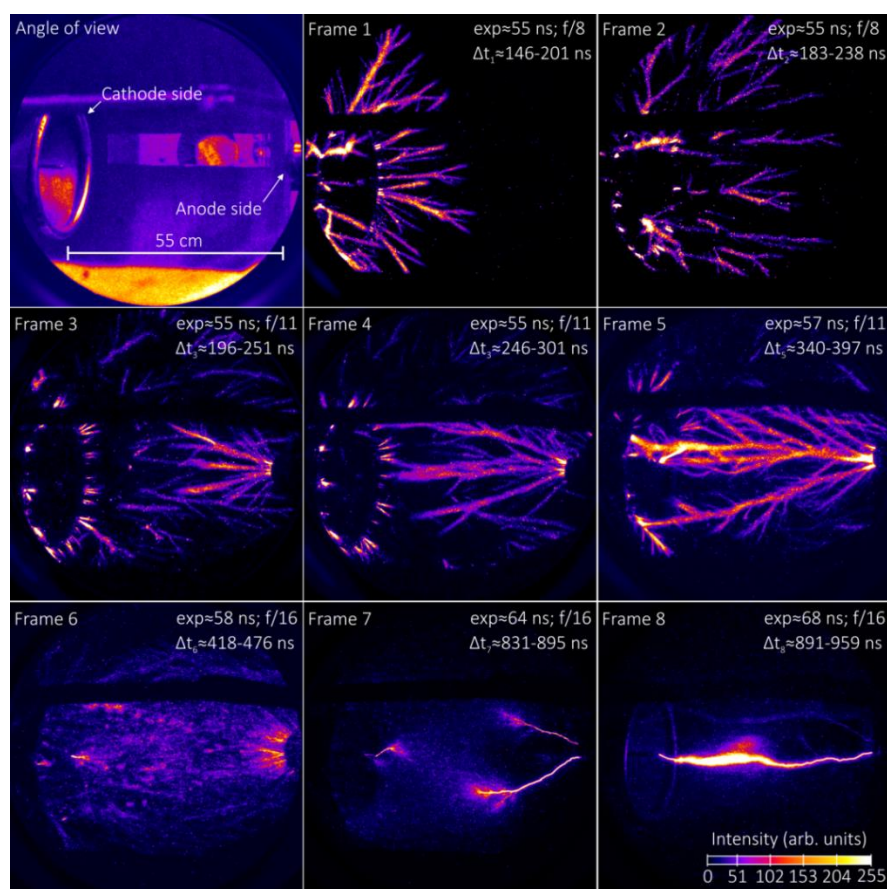


РИС. 3.15 Изображения (кадры 1-8), демонстрирующие эволюцию разряда при отрицательной полярности приложенного высоковольтного импульса на кадрах 1–8 на рис. 3.13(б).

Первые яркие плазменные структуры разряда, являясь частью протяженной стримерной короны, появляются на высоковольтном электроде за время нарастания (около 200 нс) высоковольтного импульса через десятки наносекунд после его подачи (кадр 1 на рис. 3.14 и 3.15). Стримеры отходят от высоковольтного электрода под широким телесным углом с характерной скоростью порядка  $10^8$  см/с активно разветвляются и приводят к образованию сложной сети плазменных каналов, охватывающих почти весь разрядный промежуток (кадр 2 на рис. 3.14 и 3.15). При распространении

первичных плазменных каналов, напоминающих косы, к заземленному электроду абсолютная амплитуда разрядного напряжения увеличивается приблизительно до 500-600 кВ. Концы некоторых растущих кос кажутся отделенными от ярко сияющей короны, прикрепленной к высоковольтному электроду, что хорошо видно в случае отрицательных кос на (см. рис. 3.15). Характер начальной стадии эволюции разряда одинаков для обеих полярностей подаваемого высоковольтного импульса. Когда растущие стримеры приближаются к заземленному электроду, быстро возникают встречные стримеры. Из-за положительной полярности подаваемых высоковольтных импульсов встречные потоки стримеров часто сталкивались с первичными стримерами вблизи поверхности заземленного электрода или на небольшом расстоянии от него (кадр 3 на рис. 3.14). Напротив, при отрицательной полярности встречные стримеры начинают распространяться к высоковольтному электроду с характерными скоростями  $(1 - 4) \times 10^9$  см/с, также активно разветвляются (действительно, чем ближе встречные потоки стримеров подходят к противоположному электроду, тем интенсивнее они разветвляются) и приближаются к поверхности электрода (кадры 3-5 на рис. 3.15). При распространении встречных стримерных потоков к противоположному электроду амплитуда разрядного напряжения достигает значения около 1 МВ (см. рис. 3.13, б). При положительной полярности подаваемого высоковольтного импульса максимальная амплитуда разрядного напряжения несколько меньше, примерно до 800 кВ (см. рис. 3.13, а). Это может быть обусловлено различными скоростями увеличения проводимости в плазме разряда в случаях положительной и отрицательной полярности приложенного высоковольтного импульса, поскольку условия работы генератора Маркса, при положительной и отрицательной зарядке были одинаковыми. Плазменная структура, которая образуется после того, как многочисленные стримеры пересекают весь разрядный промежуток, обладает

высокой контрастностью, но со временем становится все более и более размытой (кадр 6 на рис. 3.15). Это также наблюдается при формировании плазменного канала с положительной полярностью подаваемого высоковольтного импульса. Яркость диффузного разряда в промежутке становится тусклой, и в определенный момент от противоположных электродов отходят очень яркие узкие токовые каналы, похожие на сильноточные искры [25– 27] (кадры 4 и 7 на рис. 3.14 и 3.15). В головках таких каналов видны яркие диффузные короны, которые выглядят как короны-стримеры на вершинах лидерных каналов (кадры 5 и 7 на рис. 3.15 и 3.15) [28-31]. Процесс пробоя разрядного промежутка (сопровождающийся резким падением напряжения в зазоре и увеличением проводимости в нём) дополнительно сопровождается ростом яркости токовых каналов можно наблюдать на кадр 8 на рис. 9, когда, наконец, происходит слияние встречно растущих каналов в объеме разряда.

На рисунке 3.16 показано распределение источников СВЧ-излучения, локализованных в плоскостях XY и XZ в протяженном разряде для положительной и отрицательной полярности высоковольтного импульса, подаваемого в разрядный промежуток установки ЭРГ. Данные были получены для независимых 175 (для отрицательной полярности) и 60 (для положительной полярности) событий с использованием методов локализации, описанных в разделе с калибровкой в предыдущем разделе данной главы. Источники представлены в виде областей пространства, ограниченных эллипсоидами погрешности. Зеленым цветом обозначаются области генерации, локализуемые при отрицательной полярности приложенного импульса напряжения, желтым цветом – при положительной полярности. Характерные радиусы (усредненные по всему ансамблю локализованных областей излучения) эллипсоидов вдоль основных

координатных осей X, Y и Z равны (8,8; 1,3; 2,6) и (9,7; 1,3; 3,3) сантиметров соответственно для положительной и отрицательной полярности подаваемого высоковольтного импульса напряжения в разрядном промежутке.

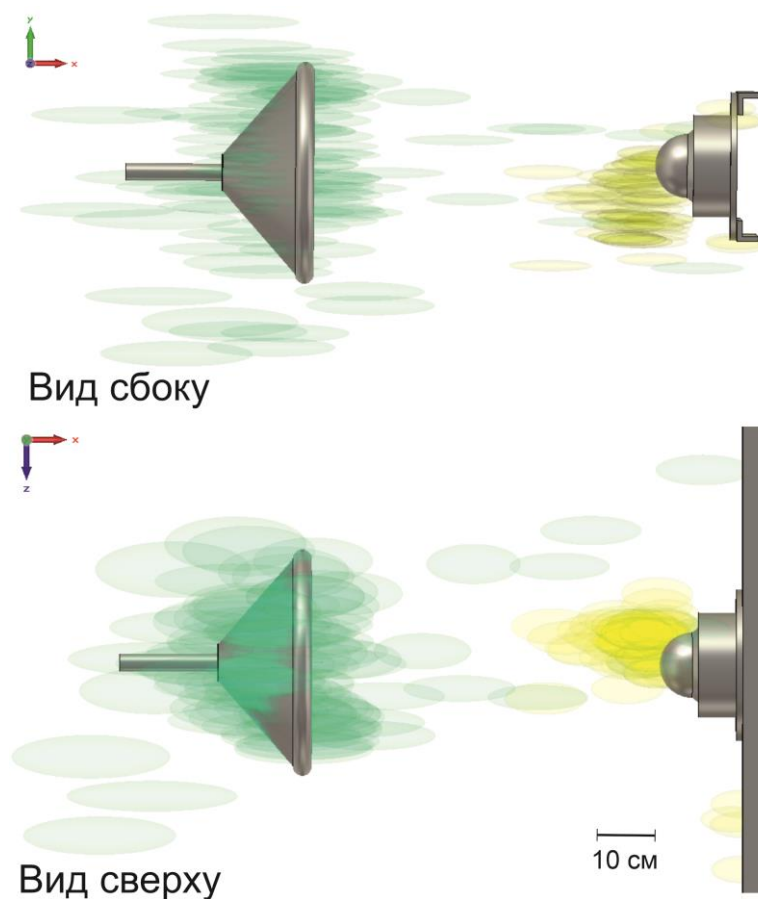


Рис.3.16 Визуализация расположения источников СВЧ вспышек в разрядном промежутке при отрицательной (зеленым цветом) и положительной (желтым цветом) полярности импульса напряжения.

Видно, что для обеих полярностей подавляющее большинство источников сверхвысокочастотного излучения сосредоточено в приэлектродных областях. При отрицательной полярности многие источники были локализованы внутри высоковольтного конического электрода. Разброс положений источников на периферии разряда существенно

ограничен геометрическими размерами конического электрода. При положительной полярности наибольшее количество источников расположено в приэлектродной зоне на расстоянии около 10-20 см от поверхности заземленного электрода. Несколько источников были зарегистрированы в областях разрядного промежутка, где заземленный электрод подключен к цепи обратного токопровода.

Рассмотрим взаимосвязь между локализованными областями сверхвысокочастотного излучения на рис. 3.16 и развитие разряда на рис. 3.14 и 3.15. При положительной полярности подаваемого высоковольтного импульса мы регистрируем слабое свечение прикатодной плазмы, когда первые пучки от высоковольтного электрода (анода) приближаются к заземленному электроду (катоде). Эта плазма приводит к последующему образованию встречных стримеров от катода. Как правило, первые яркие стримера замыкают прикатодную область за времена порядка нескольких наносекунд. В то же время, даже после того, как в прикатодной области произошло перемыкание стримеров, с катода продолжают поступать новые потоки стримеров. В результате в зоне длиной около 20-30 см вблизи катода возникает множество ответвляющихся стримеров, см. кадр 3 на рисунке. 3.14. Масштаб такой зоны сопоставим с масштабом региона, в котором сосредоточено подавляющее большинство локализованных источников сверхвысокочастотного излучения, см. рис. 3.16. На основе статистических данных, приведенных на рис. 3.16, можно выдвинуть следующее предположение. Механизм генерации интенсивного СВЧ-излучения может быть связан либо с лобовым столкновением (на небольшом расстоянии от поверхности катода) направленного на катод стримера и встречного стримера, исходящего от катода. Либо взаимодействием направленного на катод стримера с прикатодной плазмой

на поверхности металла электрода. Здесь мы намеренно подчеркиваем сложную структуру приэлектродной области, поскольку исходим из предположения, что в грубом приближении электрод можно рассматривать как поверхность из цельного металла. Эксперименты показывают, что когда первые яркие стримеры приближаются к катоду, возникает свечение прикатодной плазмы. Примечательно, что авторы исследования [48] впервые представили экспериментальные доказательства того, что именно в приэлектродных областях лабораторного разряда генерируется интенсивное СВЧ-излучение. В ранних исследованиях мы не придавали особого значения роли приэлектродных областей в генерации СВЧ-излучения, поскольку в том случае удалось локализовать определенное количество источников СВЧ-излучения вдали от электродов. Однако, как видно на рис. 3.16, такие области излучения являются скорее исключением, чем правилом для лабораторного разряда. Аналогичный вывод о механизме генерации интенсивного СВЧ-излучения напрашивается из статистических данных на рис. 3.16, полученных для отрицательной полярности приложенного высокочастотного импульса, хотя в данном случае характер развития разряда несколько иной. То встречные стримеры, возникшие на заземленном электроде (аноде), пересекают весь разрядный промежуток и приближаются к поверхности высоковольтного электрода (катода) в течение нескольких десятков наносекунд (см. кадры 3-5 на рис. 3.15). Растущие встречные потоки стримеров активно разветвляются и в принципе могут сталкиваться с любым остаточным или вторичным анодно-направленным стримером, который оказывается на их пути. Это может происходить в широкой области разрядного промежутка. Однако следует обратить внимание, что первичные стримеры от катода расширяются в широком телесном угле и даже выходят за пределы области разрядного промежутка к моменту времени, когда на аноде появляются первые встречные стримеры. Следовательно, разумно

предположить, что встречные стримеры от анода могут взаимодействовать либо с прикатодной плазмой на металлическом электроде, либо со вторичными потоками стримеров, выходящими из катода. Такое предположение согласуется с распределением областей СВЧ-излучения и их разбросом в области с катодным конусом на рис. 3.16. Идея разделения возможных триггеров СВЧ-излучения на такие процессы, как лобовое столкновение стримеров противоположной полярности и взаимодействие одиночных стримеров с приэлектродной плазмой на поверхности металлических электродов, представляется статистически обоснованной. Однако нельзя однозначно утверждать, что обнаруженные СВЧ-излучения связаны только с этими основными процессами. Более того, на большой статистике можно наблюдать области СВЧ-генерации, наблюдаемые в штучных разрядах, указывающие на то, что механизм генерации всплесков СВЧ излучения может быть гораздо более сложным.



### 3.5 Результаты 3 главы

Таким образом, в третьей главе представлены результаты трех серий экспериментов, направленных на локализацию источника радиоизлучения сантиметрового диапазона, формирующегося в начальной фазе искрового разряда. Полученные результаты согласуются с теоретическими предположениями и результатами, полученными другими диагностиками. 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 локализуются в области анода, на стадии формирования и развития стримеров в разрядном промежутке на расстоянии 10-15 см от электродов.

Во второй части третьей главы представлены методы 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. Можно сделать вывод, что приведенный метод подходит для калибровки диагностической системы радиорегистрации, и полученные результаты согласуются с теоретическими предположениями и результатами, полученными другими диагностиками.

В третьей части третьей главы показано, что источники СВЧ-излучения локализуются с сантиметровой точностью при протяженных разрядах. 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.

## Глава 4. Временные и частотные характеристики радиоизлучения искрового разряда

### 4.1 Особенности одновременной регистрации ВЧ и СВЧ излучения.

Исследовались эмиссии ВЧ- и НЧ- радиоизлучений во время развития лабораторного разряда, инициированного в промежутке 50 см, путем подачи импульса 1 МВ (отрицательной полярности) с длительностью 1 мкс и временем нарастания фронта порядка 200 нс. Разряд развивался в воздухе при нормальных условиях в промежутке, образованном катодом типа «игла внутри массивного конусного электрода» и анодом из проволочной полусферы (Рис. 4.1). Задействованный высоковольтный генератор был подробно описан в главе 3 вместе с используемыми приборами для электрофизических измерений.

В МГц диапазоне частот НЧ-радиоизлучение регистрировалось одиночной монополярной антенной (Tektronix 119-6609-00) с полосой пропускания и резонансной частотой 5–1080 и 136 МГц соответственно. Радиоизлучение в ГГц диапазоне частот регистрировалось сверхширокополосной (СШП) антенной Вивальди (описание смотри в 3 главе), установленной на диэлектрическом штативе на расстоянии примерно 3 м (в дальней зоне) от разряда и имеющей вертикальную поляризацию. Смоделированный коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) антенны показан на «вставке 1» на Рис. 4.1. Величина данного коэффициента находится в пределах 1–2 на частотах 1–10 ГГц и резко возрастает на частотах менее 1 ГГц; таким образом, микроволновое излучение надежно регистрируется на частотах выше 1 ГГц. Сигналы с монополярной антенны и антенны Вивальди регистрировались цифровым осциллографом LeCroy WM8620A (6 ГГц, 20 Гвыб/с).

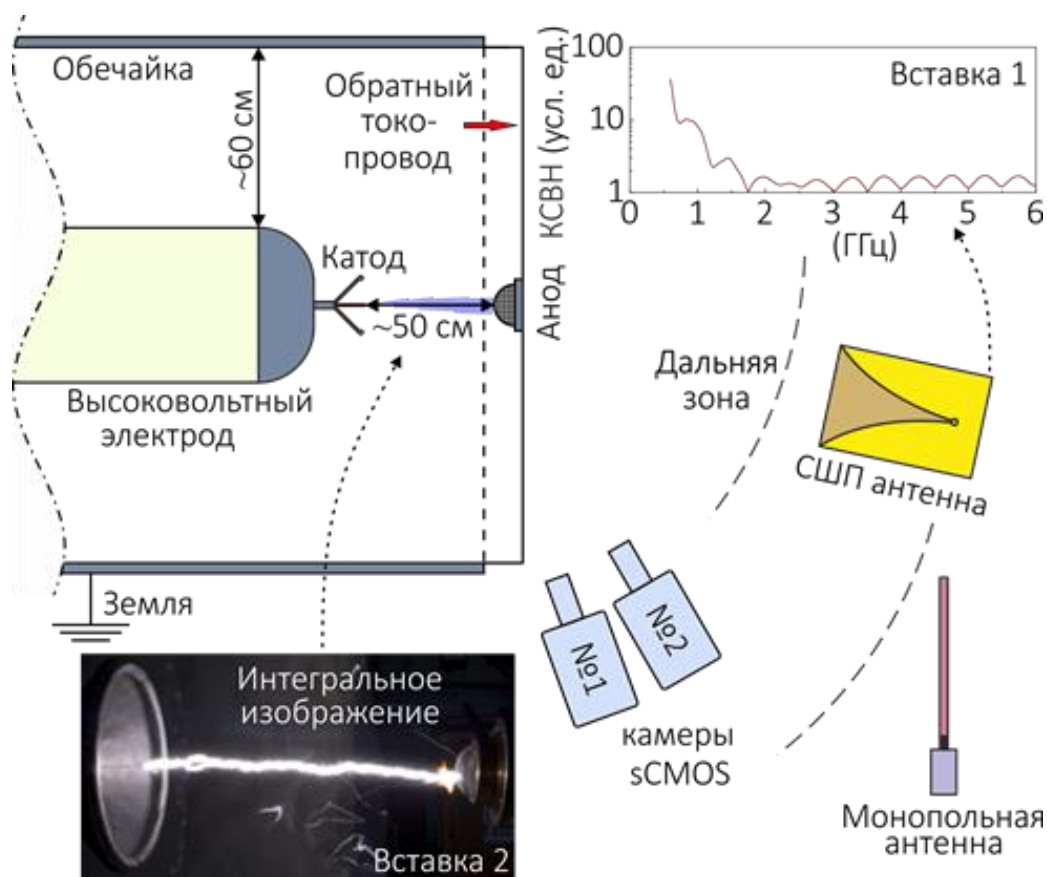


Рис. 4.1. Экспериментальная установка и устройства для регистрации электромагнитного излучения и визуализации структуры разряда. На «вставке 1» представлен смоделированный коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) для используемой сверхширокополосной (СШП) антенны. На «вставке 2» показано интегральное изображение разряда в промежутке, образованном катодом типа «игла внутри конуса» и полу-сферическим сетчатым анодом.

Хронология развития разряда отслеживалась с помощью двух sCMOS камер (PCO dicam C1) с высокой чувствительностью к одиночным фотонам и временем экспозиции 50–60 нс. Каждая камера была соединена с объективом Canon EF 85 мм f/1.8, прикрытым полосовым оптическим фильтром (300–400 нм). Камеры были расположены близко друг к другу и фотографировали разряд под углом зрения примерно 60–70° по отношению к оси промежутка, как показано на «вставке 2» на Рис. 4.1. Камеры были синхронизированы и

одновременно регистрировали два изображения свечения разряда с настраиваемой задержкой между кадрами.

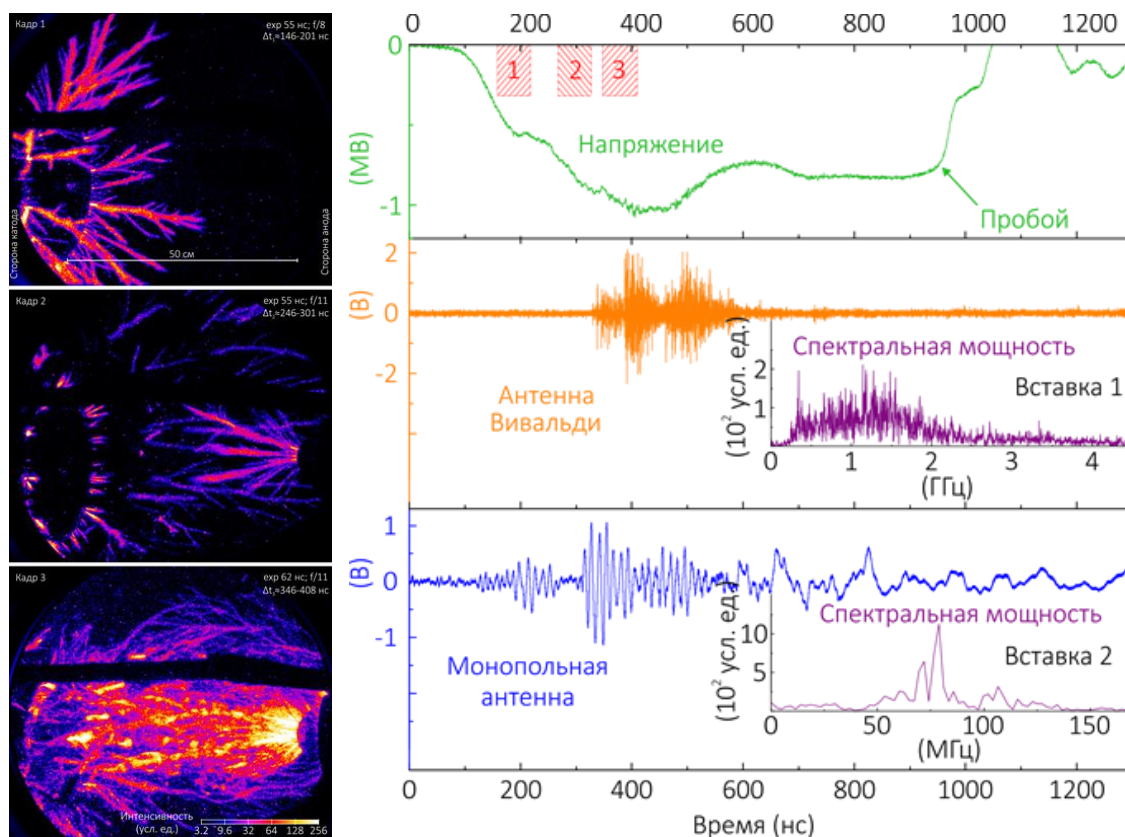


Рис. 4.2. Осциллограмма напряжения, сигналы ВЧ- и НЧ- радиоизлучения и их интегральные спектры («вставки 1 и 2»), полученные в одиночном выстреле. Цифры 1–3 на верхней панели изображения обозначают временные интервалы  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  и  $\Delta t_3$ , в которых регистрировались кадры 1–3, изображенные на левой части рисунка.

Изображения на рис. 4.2 слева получены в разных выстрелах и иллюстрируют распространение первичных стримеров к аноду (кадр 1), встречных стримеров от анода (кадр 2), а также сложную сеть многочисленных плазменных каналов, образующихся в результате интенсивного развития и размножения стримеров в объеме разряда (кадр 3). На изображениях «exp» обозначает время экспозиции соответствующего кадра.

Быстрое развитие стримеров с электродов сопровождается генерацией коротких всплесков радиоизлучения в МГц и ГГц диапазонах частот. В данном случае генерация радиоизлучения предполагается связанной с быстрыми изменениями тока и электрического поля в зонах интенсивного плазмообразования. Статистические данные показывают, что стадия интенсивного развития анодо-направленных стримеров (см. кадр 1 на Рис. 4.2) сопровождается эмиссией только НЧ-радиоизлучения (см. Рис. 4.2 справа). Можно предположить, что здесь за инициирование НЧ-радиоизлучения ответственны области разряда, заполненные растущими стримерами. Напротив, ВЧ-радиоизлучение появляется относительно НЧ-радиоизлучения с задержкой на 200 нс, и в первом приближении приходится на стадию развития разряда, когда первые стримеры возникают на поверхности анода и начинают двигаться в сторону катода. Примечательно, что мощность НЧ-радиоизлучения резко возрастает практически синхронно с появлением ВЧ-радиоизлучения. После этого предполагается, что весь разрядный промежуток излучает НЧ-радиоизлучение. Оба радиоизлучения затухают к 600 нс, при этом общая продолжительность излучений составляет примерно 430 и 300 нс для МГц и ГГц диапазонов частот соответственно.

#### 4.2 Эволюция временной структуры и спектра радиосигналов.

Отметим, что локализация каждого отдельного колебания ВЧ-радиосигнала позволяет проследить пространственную и временную эволюцию источников радиоизлучения с точностью порядка нескольких сантиметров на субнаносекундных масштабах времени. К сожалению, это чрезвычайно трудно реализовать, применяя описанный выше подход к обработке радиосигналов. К тому же, сами радиосигналы являются широкополосными, а их мощность неравномерно описывается частотами в диапазоне 1–6 ГГц. Данный факт существенно усложняет процедуру

обработки радиосигналов даже при использовании уже разработанных методик (например, см. [49]) анализа радио-вспышек. Поэтому представляет особый интерес детальное изучение временной и спектральной структуры регистрируемых ВЧ-радиосигналов и формирование базы их статистических данных для дальнейшего развития продвинутых методов обработки радиосигналов.

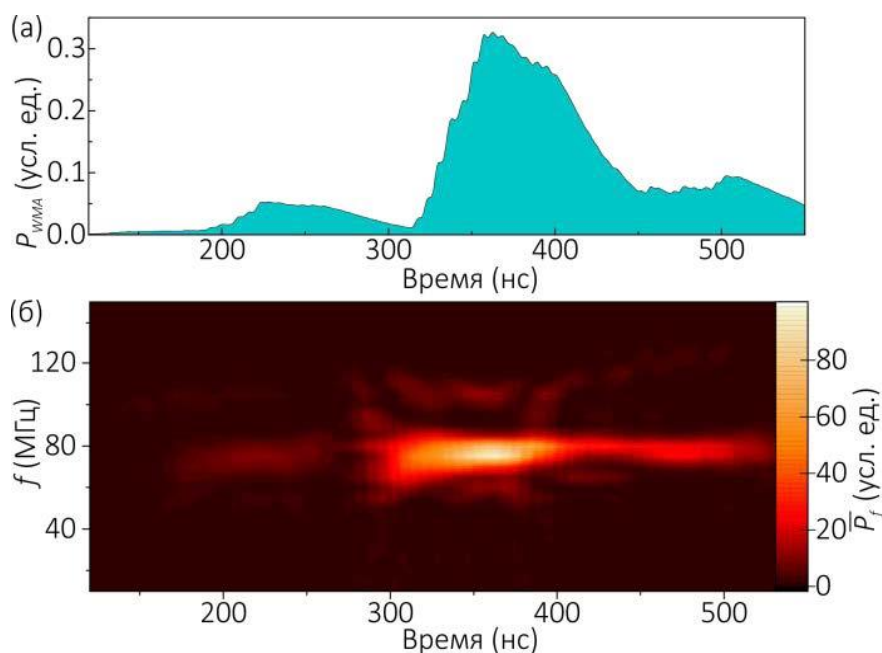
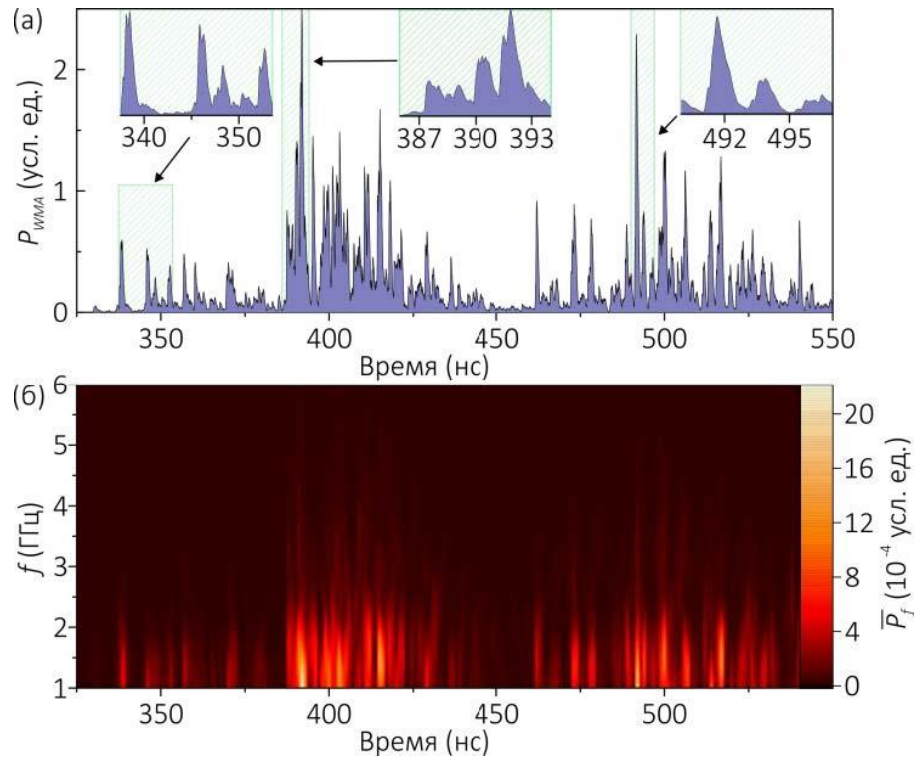


Рис. 4.3 (а) Взвешенное скользящее среднее (за 100 нс)  $P_{WMA}(t)$  мгновенной мощности, рассчитанное для сигнала monopольной антенны на Рис.4.2 в пределах 120–550 нс. (б) Карта, иллюстрирующая эволюцию спектра радиосигнала в диапазоне частот 10–150 МГц. Интенсивность карты характеризует значения средней мгновенной мощности  $P_f(t)$  во временной и частотной области  $(t, f)$ .

Рисунки 4.3 и 4.4 демонстрируют спектральные и временные характеристики регистрируемых радиосигналов. На Рис. 4.3(а) показано линейно взвешенное скользящее среднее ( $WMA$ ) (за 100 нс)  $P_{WMA}(t)$ , описывающее тренд мгновенной мощности (квадрат амплитуды)  $P(t)$  сигнала monopольной антенны на Рис. 4.2. На Рис. 4.3(б) показана карта спектра, полученная для соответствующего микроволнового сигнала. Карта

интенсивности характеризует значения средней мгновенной мощности во временной и частотной области  $(t, f)$ . Для сигнала сверхширокополосной антенны аналогичное скользящее среднее (за 1 нс) и карта спектра показаны на Рис. 4.4(а) и 4.4(б). Техники, используемые для получения спектральных и временных характеристик рассматриваемых радиосигналов, подробно описаны в дополнительных материалах к работе [50].



**Рис. 4.4** (а) Взвешенное скользящее среднее (за 1 нс)  $PWMA(t)$  мгновенной мощности, рассчитанное для сигнала сверхширокополосной антенны Вивальди на Рис. 4.2 в пределах 325–550 нс. (б) Карта, иллюстрирующая эволюцию спектра радиосигнала в диапазоне частот 1–6 МГц. Интенсивность карты характеризует значения средней мгновенной мощности  $Pf(t)$  во временной и частотной области  $(t, f)$ .

На Рис. 4.3(а) в течение 180–280 нс можно различить маломощную вспышку НЧ-радиоизлучения, совпадающую со стадией распространения стримеров к аноду. Мощность НЧ-радиоизлучения резко возрастает во временном интервале 310–410 нс, в течение которого появляется



интенсивное ВЧ-радиоизлучение. Спектр НЧ-радиоизлучения на Рис. 4.3(б) характеризуется частотами в диапазоне 10–150 МГц. Максимальные значения достигаются в диапазоне 65–85 МГц, что согласуется с интегральным спектром на «вставке 2» на Рис. 4.2. По сравнению с НЧ-радиоизлучением ВЧ-радиоизлучение имеет более сложную спектрально-временную структуру. На Рис. 4.4(а) весь ВЧ-радиосигнал представляет собой множество интенсивных вспышек короткой длительности, которые коррелируют со вспышками на карте спектра на Рис. 4.4(б). Большинство вспышек характеризуются частотами от 1 до 5 ГГц, тогда как максимальные значения достигаются в полосе частот 1–2.5 ГГц. Примечательно, что ряд наиболее интенсивных вспышек ВЧ-радиоизлучения приходится на интервал 385–395 нс. В течение этого временного интервала приложенное напряжение достигает своего максимального значения, порядка 1 МВ.

Спектр НЧ-излучений характеризуется частотами не выше 150 МГц, хотя используемая монополюсная антенна в принципе позволяет обнаруживать радиоизлучения на частотах до 1 ГГц. В целом спектральная мощность сигналов НЧ-излучения достигает максимального значения в диапазоне 60–90 МГц. Поскольку мы анализируем спектры сигналов на больших временных масштабах (связанных с полезным сигналом в интересующем временном интервале), можно заметить ненулевые значения спектральной мощности на низких частотах, ниже 10 МГц. Это предусмотрено по ненулевому среднему значению сигнала за рассматриваемый период времени. Аналогичная ситуация имеет место при анализе интегрального спектра сигнала СВЧ-излучения. Ограниченный спектр НЧ-излучения, вероятно, связан с резким падением (на много порядков) мощности СВЧ-излучения разряда при переходе на высокие частоты.

Этот факт также следует из численного моделирования в работах [7,8,13]. Таким образом, при использовании одной и той же антенны сложно обеспечить определить динамику радиоизлучения в сверхшироком диапазоне частот. Тем не менее, в нашем случае частотных характеристик используемых антенн оказалось достаточно, чтобы в первом приближении выявить временную корреляцию между излучениями ОВЧ и УВЧ -диапазона. Отметим также, что по мере затухания СВЧ-излучения проявляются медленные колебания амплитуды сигналов НЧ-излучения. Такие колебания характеризуются частотами около 10 МГц и могут быть связаны с медленными изменениями тока, проходящего через плазму в объеме разряда. Другой существенной особенностью наблюдаемого радиоизлучения является появление характерных предварительных импульсов длительностью 100 нс за 50-100 нс до начала как СВЧ-излучения, так и текущего предварительного импульса. Можно предположить, что такие предварительные импульсы НЧ-излучения связаны с развитием первичных стримерных корон в разряде и не связаны с процессами, ответственными за рентгеновское и СВЧ-излучение.

#### Заключение по главе 4

В данной 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.

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.

## Заключение

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).

Результаты данного исследования являются неотъемлемой частью более общей задачи по изучению процессов протекающих в начальной фазе сильноточного атмосферного искрового разряда, в частности по изучению плазмообразования на стадии предымпульса тока

Автор выражает благодарность научному руководителю Огинову А.В. за плодотворное обсуждение результатов и научное руководство. Также автор благодарит Паркевича Е.В. за предоставление вычислительных мощностей для моделирования параметров антенн и помощь в анализе полученных экспериментальных данных.

## Список литературы

1. Takagi M., Takeuti T. Atmospheric radiation from lightning discharge. Proceedings of the Research Institute of Atmospheric, Nagoya University. 10. (1963).
2. Brook M., Kitagawa N. Radiation from lightning discharges in the frequency range 400 to 1000 Mc/s. Journal of Geophysical Research. Т. 69, 12, 2431–2434 (1964).
3. Petersen D., Beasley W. Microwave radio emissions of negative cloud-to-ground lightning flashes. Atmos. Res., 135, 314–321 (2014)
4. Kochkin, P. O., Nguyen, C. V., van Deursen, A. P., & Ebert, U. Experimental study of hard x-rays emitted from metre-scale positive discharges in air. Journal of Physics D: Applied Physics, 45(42), 425202. (2012).
5. Cooray, V., Arevalo, L., Rahman, M., Dwyer, J., & Rassoul, H. On the possible origin of X-rays in long laboratory sparks. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71(17-18), 1890–1898. doi: 10.1016/j.jastp.2009.07.010 (2009).
6. Montanya J., Fabry F., March V., O. van der Velde, Sola G., Romero D. X-rays and microwave RF power from high voltage laboratory sparks. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 136, 94–97 (2015).
7. Feng Shi, Ningyu Liu, Joseph R. Dwyer, Kevin M. A. Ihaddadene. VHF and UHF Electromagnetic Radiation Produced by Streamers in Lightning. 46. 1, 443-451, Geophysical Research Letters doi: 10.1029/2018GL080309 (2019)
8. Luque, A. Radio frequency electromagnetic radiation from streamer collisions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122, 10497–10509. doi:10.1002/2017JD027157 (2017)

9. Shi F., Liu N. Y., Rassoul H.K. Properties of relatively long streamers initiated from an isolated hydrometeor. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 121, 7284–7295 (2016)
10. Winn W. P., et al. Lightning leader stepping, K changes, and other observations near an intracloud flash. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116.D23 (2011). doi: 10.1029/2011JD015998
11. Scholten O., et al. Radio emission from negative lightning leader steps reveals inner meter-scale structure. *Phys. Rev. Lett.* 124.10 (2020): 105101.
12. Kochkin P., Montanya J., March V. X-rays from long laboratory sparks in air. *Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases, Volume 1: Techniques and Measurements.* 157 (2016)
13. Stankevich Y. L., Kalinin V. G. Fast electrons and X-ray radiation during the initial stage of growth of a pulsed spark discharge in air. *Soviet Physics Doklady.* 12, 1042 (1968)
14. Shi F., Liu N., Dwyer J. R., Ihaddadene K. M. A. VHF and UHF Electromagnetic Radiation Produced by Streamers in Lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 443–451 (2018)
15. Stolzenburg M. etc al., Electric field values observed near lightning flash initiations, *Geophys. Res. Lett.* (2007)
16. Гуревич А.В, Зыбин К.П., Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы, *УФН* 2001, том 171, №11.
17. Gurevich A.V., Milikh G. A., Roussel-Dupre R, *Phus. Lett. A* 165–463 (1992).
18. Базелян Э.М., Райзер Ю.П., *Физика молнии и молниезащиты.* М.: Физматлит, (2001)
19. Gurevich A.V., Mitko G.G., Antonova V.P., Chubenko A.P., Karashtin A.N., Kryukov S.V., Naumov A.S., Pavljuchenko L.V., Ptitsyn M.O., Ryabov V.A., Shalamova S.Ya., Shepetov A.L., Shlyugaev Yu.V., Vildanova L.I., Zybin

- K.P., An introcloud discharge caused by extensive atmospheric shower, *Physics Letters A* 2009, v.373, pp.3550 – 3553.
20. Гуревич А.В., Караштин А.Н., Рябов В.А., Чубенко А.П., Щепетов А.Л., Нелинейные явления в ионосферной плазме. Влияние космических лучей и пробоя на убегающих электронах на грозовые разряды, *Успехи физических наук* 2009, том 179, № 7, стр. 779 – 790.
21. Gurevich A.V., Chubenko A.P., Karashtin A.N., Mitko G.G., Naumov A.S., Ptitsyn M.O., Ryabov V.A., Shepetov A.L., Shlyugaev Yu.V., Vildanova L.I., Zybin K.P., Gamma-ray emission from thunderstorm discharges, *Physics Letters A*, v.375, pp.1619 – 1625, (2011).
22. Meek J. M. A theory of spark discharge // *Physical review*. – 1940. – Т. 57. – №. 8. – С. 722.
23. Raizer Y. P., Allen J. E. Gas discharge physics. – Berlin : Springer, 1997. – Т. 2. – С. 11-13.
24. Koile J., Shi F., Liu N., Dwyer J., Tilles J. Negative streamer initiation from an isolated hydrometeor in a subbreakdown electric field // *Geophysical Research Letters*. – 2020. – Т. 47. – №. 15. – С. e2020GL088244.
25. Marshall R. A., Inan U. S. High-speed telescopic imaging of sprites // *Geophysical research letters*. – 2005. – Т. 32. – №. 5.
26. Stolzenburg M., Marshall T. C., Rust W. D., Bruning E., MacGorman D. R., Hamlin T. Electric field values observed near lightning flash initiations // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Т. 34. – №. 4.
27. Loeb L. B. The mechanisms of stepped and dart leaders in cloud-to-ground lightning strokes // *Journal of Geophysical Research*. – 1966. – Т. 71. – №. 20. – С. 4711-4721.
28. Lamb D., Verlinde J. *Physics and chemistry of clouds*. – Cambridge University Press, 2011.



29. Dawson G. A. Pressure dependence of water-drop corona onset and its atmospheric importance //Journal of geophysical Research. – 1969. – Т. 74. – №. 28. – С. 6859-6868.
30. Griffiths R. F., Latham J. Electrical corona from ice hydrometeors //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 1974. – Т. 100. – №. 424. – С. 163-180.
31. Dubinova A., Rutjes C., Ebert U., Buitink S., Scholten O., Trinh G. T. N. Prediction of lightning inception by large ice particles and extensive air showers //Physical review letters. – 2015. – Т. 115. – №. 1. – С. 015002.
32. Kosar B. C., Liu N., Rassoul H. K. Formation of sprite streamers at subbreakdown conditions from ionospheric inhomogeneities resembling observed sprite halo structures //Geophysical Research Letters. – 2013. – Т. 40. – №. 23. – С. 6282-6287.
33. Liu N., Kosar B., Sadighi S., Dwyer J. R., Rassoul H. K. Formation of Streamer Discharges from an Isolated Ionization Column at Subbreakdown Conditions //Physical Review Letters. – 2012. – Т. 109. – №. 2. – С. 025002.
34. Köhn C., Chanrion O., Neubert T. The sensitivity of sprite streamer inception on the initial electron-ion patch //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2019. – Т. 124. – №. 4. – С. 3083-3099.
35. Petrov N. I. Synchrotron mechanism of X-ray and gamma-ray emissions in lightning and spark discharges //Scientific Reports. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 19824.
36. Cooray V. Cooray, G., Rubinstein, M., Rachidi, F. Ionization waves enhance the production of x-rays during streamer collisions //Atmosphere. – 2021. – Т. 12. – №. 9. – С. 1101.
37. Рязанов И. Г., Бякин А. А., Белоусов О. А. Анализ и синтез широкополосной планарной щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели для систем широкополосного доступа.

Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского, 2, 297–306 (2013).

38. Куроптев П. Д., Левяков В. В., Фатеев А. В. Широкополосная рупорная антенна диапазона 0, 8-30 ГГц // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Т. 19, №. 2, 23–27 (2016)
39. Parkevich, E. V., Medvedev, M. A., Ivanenkov, G. V., et al. Fast fine-scale spark filamentation and its effect on the spark resistance. *Plasma sources science & technology*, 28, 9 (2019)
40. Moosazadeh M., Kharkovsky S., Case J. T., Samali B. Antipodal Vivaldi antenna with improved radiation characteristics for civil engineering applications // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. – 2017. – Т. 11. – №. 6. – С. 796-803.
41. Кубанов В.П., Ружников В.А., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М. К61 Основы теории антенн и распространения радиоволн: Учебное пособие/ Под ред. В.П. Кубанова. – С.: ИНУЛ-ПГУТИ, 2016. – 258 с.: ил. ISBN 978-5-9912-0152-0
42. D. Petersen et al. A brief review of the problem of lightning initiation and a hypothesis of initial lightning leader formation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, V. 113, D17 (2008), DOI: 10.1029/2007JD009036.
43. I.M. Kutsyk, L.P. Babich. Heating of a Local Region of a Branching Streamer as a Starting Point of a Space Leader and a Negative-Leader Step. *Plasma Physics Reports*. V. 47(3), 251-256. (2021). DOI: 10.1134/S1063780X21030089
44. V. Cooray. On the minimum length of leader channel and the minimum volume of space charge concentration necessary to initiate lightning flashes in thunderclouds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V. 136. P. 39-45 (2015). DOI: 10.1016/j.jastp.2015.09.008.

45. С. А. Чайковский, А. В. Огинов, К. В. Шпаков, В. А. Богаченков, Е. Н. Волков, Ю.А. Суковатицин. Изв. Высших Учебных Заведений. Физика 58(9/2), 258-262 (2015)
46. Agafonov A. V., Oginov A. V., Rodionov A. A., Ryabov V. A., Shpakov K. V. Plasma Sources Science and Technology. 28(9), 095014 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab3c79
47. A. V. Agafonov, V. A. Bogachenkov, A. P. Chubenko, A. V. Oginov, A. A. Rodionov, A. S. Rusetskiy, V. A. Ryabov, A. L. Shepetov and K. V. Shpakov. J. Phys. D: Appl. Phys. 50(16), 165202. (2017). DOI: 10.1088/1361-6463/aa5dba.
48. Zudin I. et al. Amplitude–temporal and spectral characteristics of pulsed UHF-SHF radiation of a high-voltage streamer discharge in air under the atmospheric pressure //Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 24. – С. 9425.
49. Scholten O. et al. Interferometric imaging of intensely radiating negative leaders //Physical Review D. – 2022. – Т. 105. – №. 6. – С. 062007.
50. 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.