

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

На правах рукописи

Паркевич Егор Вадимович

**Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном искровом  
разряде в воздухе**

Специальность: 01.04.08.

Физика плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении  
науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

**Пикуз Сергей Александрович**, доктор физ.-мат. наук, главный научный  
сотрудник, Отдел физики высоких плотностей энергии Отделения ядерной  
физики и астрофизики Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Научный консультант:

**Огинов Александр Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный  
сотрудник, Отдел физики высоких плотностей энергии Отделения ядерной  
физики и астрофизики Физического института им. П. Н. Лебедева РАН

Официальные оппоненты:

**Данько Сергей Александрович**, доктор физ.-мат. наук, доцент, начальник  
лаборатории оптической и рентгеновской диагностики Отдела источников  
излучения Отделения прикладной физики Курчатовского комплекса ядерных  
транспортных энергетических технологий (НИЦ «Курчатовский институт»)

**Леонов Алексей Георгиевич**, доктор физ.-мат. наук, профессор, Зав. кафедрой  
Прикладной физики Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-  
технический институт (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный  
институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года в \_\_\_:\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета Д 002.023.02 на базе Физического  
института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский  
пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте  
[www.lebedev.ru](http://www.lebedev.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.02

кандидат физ.-мат. наук

К. Ю. Вагин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию особенностей генерации плазмы высокой степени ионизации во время развития импульсного наносекундного искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении.

### Актуальность темы.

Известно, что появление очагов интенсивного плазмообразования на электродах играет решающую роль в усилении эффекта контракции импульсного наносекундного разряда в газе – стягивания разряда в тонкие шнуры плазмы [1, 2]. Развитие контракции разряда также предопределяет его переход в сильноточный режим – стадию искры и дуги, сопровождающийся резким возрастанием тока разряда. Эффект контракции представляет большой интерес для многих приложений импульсного наносекундного разряда. Благодаря контракции, приводящей к формированию тонких искровых каналов с высокой степенью ионизации плазмы [2–4], удается получать за наносекундные времена высокие удельные энергии, вводимые в единицу объема газа. Эффект контракции активно используется в различных системах с плазменно-стимулированным горением газообразных топливных смесей [5, 6], в технике на основе сильноточных газовых коммутаторов [7], и многих других. Обладая высокой проводимостью и плотностью тока, контрагированный искровой канал способен обеспечить большие мощности вложения удельной энергии в материал металлического образца. Высокие удельные энерговыкладки не только меняют физико-химические свойства обрабатываемой поверхности образца, но и позволяют произвести синтез новых материалов (частиц) при взаимодействии с газоразрядной плазмой. Благодаря этому воздействие искрового канала на электроды находит применение при обработке поверхности различных материалов, а также при генерации наночастиц с использованием искровых генераторов [8, 9].

Широкое практическое применение и разнообразие физических процессов, протекающих при взаимодействии искрового канала с поверхностью электрода, стимулирует детальное исследование явления

контракции импульсного наносекундного разряда в газе для развития соответствующих приложений. В связи с этим процессы быстрой генерации первичной приэлектродной плазмы высокой степени ионизации в микромасштабах поверхности электродов заслуживают особого внимания, поскольку они во многом определяют переход наносекундного разряда в газе в сильноточный режим (стадию искры и дуги). Интерес также представляет уточнение данных о параметрах приэлектродной плазмы и её эволюции на временах, сравнимых с одной наносекундой, и пространственных масштабах порядка единиц микрон. Динамика приэлектродной плазмы на данных масштабах времени и пространства пока недостаточно изучены широкодоступными методами диагностики плазмы.

Неоднородность генерации приэлектродной плазмы и развитие в ней неустойчивостей [10, 11] могут существенным образом влиять на характер контракции импульсного наносекундного разряда в газе. Формирование токовых каналов с высокой степенью ионизации плазмы вследствие контракции импульсного наносекундного разряда может также сопровождаться мелкомасштабной филаментацией. Данный эффект может рассматриваться как фундаментальный субпроцесс более общего процесса контракции, провоцирующий развитие сложной нитевидной микроструктуры у одиночных искровых каналов. Существование данного эффекта подтверждается многими косвенными фактами, но до сих пор остается предметом дискуссий в виду отсутствия надежных данных о характеристиках микроструктуры одиночных искровых каналов. Существенные трудности в изучении микроструктуры одиночных искр обусловлены её мелкомасштабностью, быстрой эволюцией, спорадичностью в пространстве и принципиальной сложностью диагностики самого объекта исследования.

**Целью** диссертационной работы является исследование особенностей генерации плазмы высокой степени ионизации в приэлектродных областях и во всём объёме воздушного разрядного промежутка на временах, сравнимых с одной наносекундой, и масштабах порядка единиц микрон.

Для этого в ходе выполнения работы решались следующие **задачи**:

1. Разработка комплекса диагностик плазмы на временах, сравнимых с одной наносекундой, и масштабах, близких к единицам микрон.
2. Разработка методов численной обработки данных, получаемых методами лазерного зондирования плазмы.
3. Получение надежных данных о параметрах приэлектродной плазмы и её динамике.
4. Уточнение роли неоднородности генерации приэлектродной плазмы в создании и поддержании условий для формирования последующей микроструктуры одиночных искровых каналов.
5. Изучение характеристик и эволюции микроструктуры искровых каналов с использованием методов лазерного зондирования.

**Научная новизна** проделанной работы заключается в следующем:

- получены новые данные о параметрах и динамике приэлектродной плазмы высокой степени ионизации в момент перехода импульсного наносекундного разряда в сильноточный режим;
- установлена связь взрывных процессов генерации первичной приэлектродной плазмы с развитием фронтов мощной ионизации, распространяющихся от областей первоначального взрыва на катоде и аноде. Показано, что фронты ионизации неустойчивы и сопровождаются их дроблением на нитевидные плазменные каналы диаметром порядка 10 мкм;
- подтверждено существование эффекта нестационарной мелкомасштабной филаментации, приводящей к развитию сложной нитевидной микроструктуры у одиночных искровых каналов. Получены данные о характеристиках микроструктуры искровых каналов, изучена её динамика во времени и в пространстве.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в получении новых знаний о быстропротекающих процессах в импульсном наносекундном разряде в газе, сопровождающих инициирование и развитие искровых каналов с высокой степенью ионизации плазмы. Результаты диссертационной работы

тесно связаны со многими широко обсуждаемыми научными проблемами в области физики газового разряда и динамики сложных систем, а также имеют перспективы практических применений. Результаты исследований могут быть важны для развития методов контроля параметров газоразрядных систем, в которых используется или возникает эффект контракции газового разряда.

**Методология и методы исследования.** В работе проведены исследования формирования импульсного наносекундного разряда в воздушной среде с использованием диагностической системы быстрого фотографирования плазмы. Система основана на использовании методов лазерного зондирования и включает в себя одновременную регистрацию интерферограмм, тенеграм, и шлирен изображений с высоким пространственным (до 3 мкм) и временным (при субнаносекундном времени экспозиции кадров и скважности кадров на уровне 1–2 нс) разрешением. Данные о характеристиках плазмы (распределении показателя преломления, электронной плотности и её градиентов) получены при помощи обработки интерферограмм. Для этого была разработана специализированная процедура обработки интерференционных изображений, которая включает в себя подавление шумов на изображении (предобработка), алгоритмы поиска экстремальных точек (максимумы и минимумы интенсивности интерференционной картины), построение трасс интерференционных полос, извлечение распределения сдвига фазы излучения, прошедшего просвечиваемые плазменные формирования. Представлен подход к решению обратной задачи по восстановлению распределения электронной плотности плазмы по измеренному сдвигу фазы, обсуждены смежные проблемы данной задачи. Наряду с оптическими диагностиками газоразрядной плазмы, в работе проведены измерения электрофизических характеристик разряда.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1) Разработанный комплекс диагностики импульсной плазмы, включающий в себя высоковольтный генератор, синхронизованный с пикосекундным лазером с точностью  $\sim 1$  нс; системы многокадрового

фотографирования плазмы с использованием методов лазерного зондирования; системы одновременной съёмки лазерных теневых, интерференционных и шпирен изображений плазмы с пространственным разрешением до 3 мкм.

2) Методы и алгоритмы численной обработки лазерных интерферограмм с точностью нахождения сдвига фаз 0.63 рад, включающие: шумоподавление с использованием Фурье-фильтрации и выравнивание интенсивности интерференционной картины; алгоритмы итеративного поиска экстремальных точек; технику построения трасс интерференционных полос; процедуру извлечения двумерной карты сдвига фазы зондирующего излучения с использованием опорного интерференционного кадра; восстановление распределения плотности электронов плазмы.

3) Оценки оптических характеристик плазмы и анализ механизмов её визуализации в поле лазерного излучения показали, что плазма вдали от электродов является оптически прозрачной для лазерного излучения с длиной волны 532 нм при плотности и температуре электронов  $n_e \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и  $T_e \sim 1 - 5 \text{ эВ}$ , а показатель преломления плазмы связан с концентрацией электронов в рамках приближения идеальной плазмы; приэлектродная плазма может быть непрозрачной, иметь электронную плотность выше  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  и быть многокомпонентной, состоять из ионизованных молекул и атомов воздуха и электрода.

4) Исследование эволюции прикатодной и прианодной плазмы высокой степени ионизации, генерируемой на ранней стадии развития импульсного наносекундного разряда в воздухе: момент перехода разряда в сильноточный режим с субнаносекундной точностью совпадает с моментом появления прикатодной и прианодной плазмы с электронной плотностью  $n_e \sim 10^{19} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$  и градиентами электронной плотности  $\sim 10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-4}$ ; Генерация катодной и прианодной плазмы носит взрывной характер, приводит к появлению первичных сгустков плазмы размером  $\sim 10 \text{ мкм}$  с последующим выбросом вещества электрода, сопровождающегося изменением морфологии его поверхности; Появление прианодной плазмы зависит от геометрии разрядного

промежутка, качества полировки поверхности анода, а также от плотности мощности энергии, подводимой к поверхности анода бомбардирующими электронами; За время  $\sim 1$  нс прикатодная и прианодная плазма дают старт развитию фронтов ионизации, распространяющихся со средней скоростью  $7 \times 10^6$  см/с и создающих плазму в промежутке с электронной плотностью выше  $n_e \sim 10^{19}$  см $^{-3}$ .

5) Исследование эффекта быстрой мелкомасштабной искровой филаментации, приводящий к развитию сложной нитевидной микроструктуры у растущих анодо-направленных и катодно-направленных искровых каналов: фронты ионизации, распространяющиеся от областей первоначального взрыва на катоде и аноде, неустойчивы и сопровождаются их дроблением на нитевидные плазменные каналы диаметром  $\sim 10$  мкм, что приводит к развитию сложной нитевидной микроструктуры с количеством микроканалов плазмы в объеме разряда до нескольких десятков и более; Измеренные скорости роста микроканалов с электродов составили  $\sim 10^8 - 10^9$  см/с, что заметно выше характерной скорости расширения приэлектродной плазмы на катоде и аноде; Электронная плотность плазмы одиночных микроканалов может составлять  $\sim (1-5) \times 10^{19}$  см $^{-3}$ , что свидетельствует о достижении почти полной диссоциации и однократной ионизации молекул воздуха.

**Степень достоверности результатов.** Подходы к численной обработке данных, получаемых при помощи методов лазерного зондирования плазмы, тестировались на примере решения модельных задач. Используемые методы быстрой съёмки плазмы калибровались в экспериментах. Отдельно анализировалась проблема пространственного разрешения используемой оптики, были уточнены параметры оптики, необходимые для надежной регистрации мелкомасштабных плазменных формирований. Производилась систематизация количественных данных о параметрах плазмы, данные анализировались на предмет корректности в плане достигнутой точности их получения. Многие представленные в диссертационной работе результаты находятся в согласии с результатами, полученными независимыми

экспериментальными группами, занимающимися тематикой импульсного наносекундного разряда в газе. Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, а также публиковались в рецензируемых научных журналах.

**Научные публикации.** Результаты по теме диссертации изложены в 2 коллективных монографиях, в 12 журнальных статьях, в 18 тезисах трудов конференций; 12 статей изданы в журналах, рекомендованных ВАК, входящих в базы данных Scopus и Web of Science.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации представлялись и докладывались автором на 16 Международных и Всероссийских конференциях: XLVII, XLVI, XLV, XLIV, Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС, 2020 (16–20 марта), 2019 (18–22 марта), 2018 (2–6 апреля), 2017 (13–17 февраля), Россия, Звенигород; Школе молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО) в 2019 (12–14 ноября), 2020 (24–26 ноября) гг., Россия, Москва; V, IV International Conference on Ultrafast Optical Science Ultrafast Light, 2021 (October 4–8), 2020 (September 28–October 2), Russia, Moscow; XXXVI, XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, 2021 (March 1–6), 2019 (March 1–6), Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus; XXXV, XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, 2020 (March 1–6), 2018 (March 1–6), Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus; Advances and Applications in Plasma Physics (AAP). Congress center of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 2019 (September 18–20), Russia, St. Petersburg; Всероссийской конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП), 2020 (9–13 ноября), 2017 (5–9 июня), Россия, Казань; 19<sup>th</sup> International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, 2020 (September 15–17), Russia, Moscow.

**Вклад автора.** Содержание диссертации отражает основные исследования особенностей генерации плазмы высокой степени ионизации во время развития импульсного наносекундного разряда в воздушной среде,

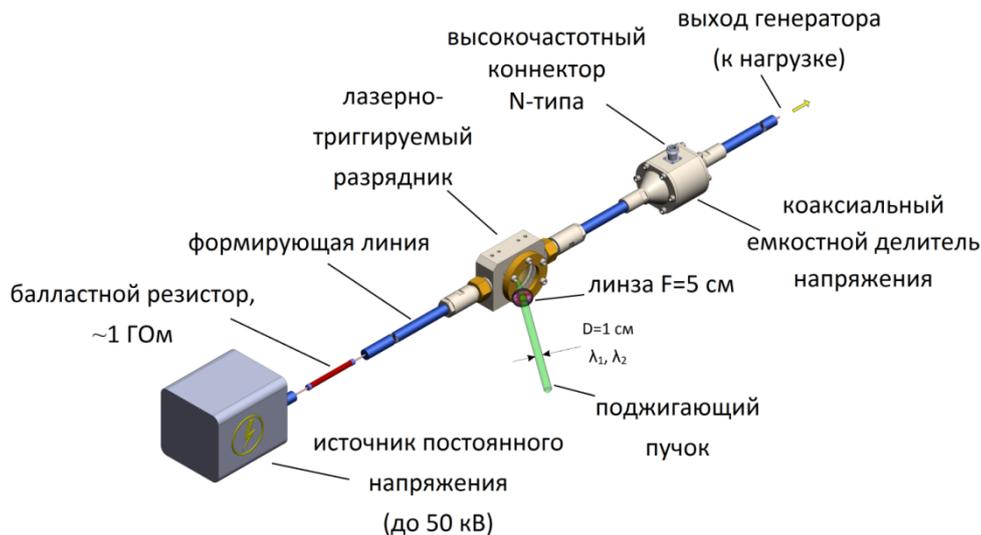
проведенные автором. Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал непосредственное участие в выборе объектов исследования, постановке задач, разработке диагностик, обработке данных и обсуждении полученных результатов.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 114 страниц, включая 38 рисунков. Список литературы содержит 128 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

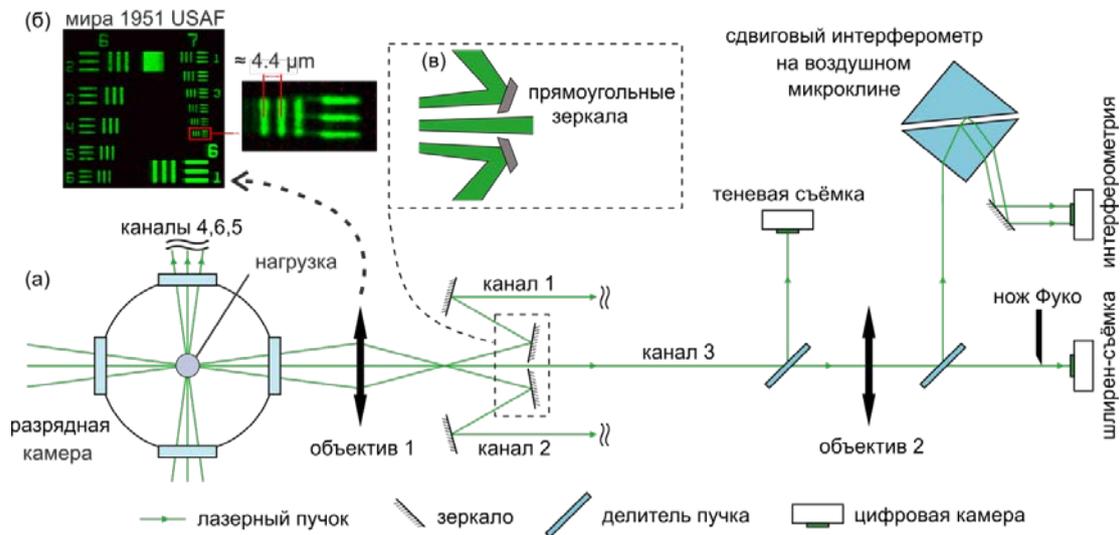
Во **введении** приводится обзор научной литературы по теме диссертационной работы, обосновывается актуальность исследований, формулируется цель и задачи работы, анализируется научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, формулируются защищаемые положения, указываются сведения об апробации работы и её достоверности.

**Первая глава** диссертации посвящена технической реализации диагностики плазмы. Представлено решение проблемы жесткой синхронизации высоковольтного оборудования и источника лазерного излучения (пикосекундный лазер Lotis LS-2151 Nd: YAG) для постановки экспериментов по исследованию формирования импульсного наносекундного разряда в воздушной среде. Описан разработанный высоковольтный генератор (Рис. 1), управляемый на основе лазерно-триггируемого разрядника (ЛТР). Разрядник был интегрирован в электрическую схему генератора и являлся его непосредственной частью. В качестве основы высоковольтного генератора была положена схема генерации импульса напряжения с использованием коаксиальной кабельной линии.



**Рис. 1** Схема высоковольтного генератора на основе лазерно-триггеруемого разрядника (ЛТР).

Дано детальное описание дизайна разработанного разрядника, используемого для запуска высоковольтного генератора от поджигающего лазерного пучка. Отмечены нюансы настройки поджига лазерно-триггеруемого разрядника для достижения необходимых условий жесткой синхронизации пикосекундного лазера и высоковольтного генератора. Приведены результаты исследований коммутационных характеристик (время задержки срабатывания, разброс срабатывания, время нарастания фронта выдаваемого импульса) ЛТР в зависимости от энергии поджигающего лазерного пучка и величины постоянного напряжения, прикладываемого к поджигаемому промежутку ЛТР. Определены ключевые условия поджига промежутка ЛТР и параметры поджигающего лазерного пучка для достижения времени задержки пробоя и джиттера ЛТР не дольше 1 нс. Описана схема транспортировки высоковольтного импульса к нагрузке – исследуемому разрядному промежутку, наполняемого сухим воздухом при атмосферном давлении. Обсуждаются дизайн и схемы калибровки разработанных коаксиального емкостного делителя напряжения (работающего в режиме бегущей волны и измеряющего параметры высоковольтного импульса, выдаваемого генератором), а также датчиков напряжения и тока, используемых для электрофизических измерений параметров разряда.



**Рис. 2** Схема многокадровой оптической системы регистрации с одновременной интерферометрией, теньевым и шлирен фотографированием (а), фотография тестовой миры (1951 USAF), снятой позади объектива 1 («Эра-14») с увеличением в 30 раз (б), схема разделения трех зондирующих лазерных пучков позади собирающего объектива (в). Дизайн третьего оптического канала идентичен остальным каналам.

Описана схема разработанной многокадровой оптической системы регистрации, см. Рис. 2(а), позволяющей регистрировать изображения плазменных образований с высоким временным (при субнаносекундном времени экспозиции кадров и скважности кадров на уровне 1–2 нс) и пространственным (до 3 мкм) разрешением, см. Рис. 2(б).

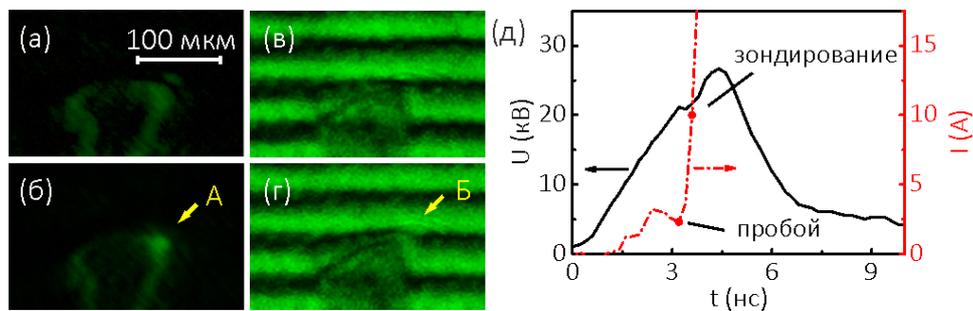
Описана схема разделения расходящихся лазерных пучков позади собирающего объектива, см. Рис. 2(в), для организации техник визуализации плазменных формирований. В качестве техник визуализации использовались лазерная сдвиговая интерферометрия, теньевая и шлирен фотосъемка. Подробно обсуждаются каждая из техник и нюансы её реализации, в частности, представлены схемы сдвиговой интерферометрии на призмном интерферометре с воздушным микроклином и шлирен фотографирования посредством несимметричного урезания спектра изображения в фокальной плоскости дополнительного объектива, расположенного позади первого собирающего объектива. Представлена оптическая схема, позволяющая

одновременно регистрировать интерференционное, теневое и шпирен изображение для каждого из зондирующих пучков.

Во **второй главе** рассказано про разработанный подход к обработке результатов лазерной интерферометрии, выступающей в качестве основной техники получения количественных данных о характеристиках плазмы. Обсуждаются алгоритмы поиска экстремальных точек на интерферограмме, построения трасс интерференционных линий, а также получения двумерной карты сдвига фазы излучения, прошедшего сквозь просвечиваемый объект. Представлен подход к решению обратной задачи по восстановлению распределения показателя преломления/электронной плотности плазмы по измеренному сдвигу фазы излучения при малой аккумуляции ошибки численного счета. Данные процедуры были разработаны совместно с к.ф.-м.н. Хирьяновой Александрой Игоревной. Оцениваются оптические характеристики наблюдаемой газоразрядной плазмы, описывается связь показателя преломления с электронной плотностью плазмы.

**Третья глава** повествует об основных полученных результатах. Глава условно разделена на две ключевые подчасти, которые посвящены ранней и поздней стадиям развития искровых каналов в импульсном наносекундном разряде в воздухе.

В первой части третьей главы представлены результаты исследований эволюции первичной приэлектродной плазмы в микромасштабах поверхности электродов, генерируемой на временах, сравнимых с одной наносекундой. Установлено, что момент перехода импульсного наносекундного разряда (инициированного в малом разрядном промежутке в воздухе при атмосферном давлении) в сильноточный режим (момент электрического пробоя, сопровождающегося резким ростом тока разряда) с субнаносекундной точностью совпадает с моментом появления прикатодной плазмы высокой степени ионизации (Рис. 3).



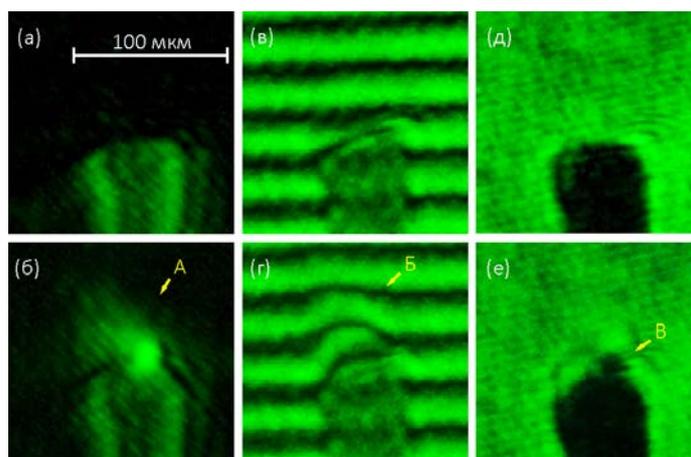
**Рис. 3** Прикатодная зона. Шлирен изображения (а, б) и интерферограммы (в, г), полученные до подачи высоковольтного импульса (а, в) и через  $\Delta t \approx 0.5$  нс (б, г) после момента пробоя промежутка. Среда – сухой воздух при атмосферном давлении; А – катодное пятно, визуализируемое шлириен-съёмкой, Б – плазма с электронной плотностью  $n_e \sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Катод – медная проволочка диаметром 50 мкм. Характеристики разряда (д):  $U$  – напряжение,  $I$  – ток.

Показано, что генерация катодной плазмы носит взрывной характер и приводит к появлению первичных микронных сгустков плазмы с последующим выбросом плазмы части вещества катода (Рис. 4). Обнаружено, что за время, соизмеримое с одной наносекундой, прикатодная плазма дает старт развитию фронта ионизации, распространяющегося от области первоначального взрыва на катоде со средней скоростью 70 мкм/нс.

Описаны параметры и динамика плазмы, генерируемой в микронных масштабах поверхности анода в момент перехода импульсного наносекундного разряда в сильноточный режим. Установлено, что величины электронной плотности ( $\sim 10^{19} - 10^{20}$  см<sup>-3</sup>) и градиентов электронной плотности ( $\sim 10^{22} - 10^{23}$  см<sup>-4</sup>) прианодной плазмы схожи с параметрами прикатодной плазмы.

Показано, что генерация прианодной плазмы высокой степени ионизации также носит взрывной характер и сопровождается резким изменением морфологии поверхности анода. Отмечено, что генерация прианодной плазмы носит пороговый характер и зависит от геометрии разрядного промежутка, качества полировки поверхности анода, плотности мощности энергии подводимой к поверхности анода бомбардирующими электронами. Показано, что за время соизмеримое с одной наносекундой прианодная плазма также дает

старт развитию фронта ионизации, распространяющегося от области генерации плазмы на аноде со средней скоростью 70 мкм/нс.



**Рис. 4** Прикатодная зона. Шлирен изображения (а, б), интерферограммы (в, г) и тенеграммы (д, е), полученные до подачи высоковольтного импульса (а, в, д) и через 1 нс (б, г, е) после момента пробоя промежутка. Среда – сухой воздух при атмосферном давлении; А – области высоких градиентов электронной плотности ( $|\nabla n_e| \sim 10^{22} - 10^{24} \text{ см}^{-4}$ ), Б – плазма прозрачная для излучения, В – сгусток непрозрачной плазмы. Катод – медная проволоочка диаметром 50 мкм.

Вторая часть третьей главы посвящена поздней стадии разряда и затрагивает проблему формирования нитевидной микроструктуры у одиночных искровых каналов. Показано, что фронты ионизации, распространяющиеся от областей первоначального взрыва на катоде и аноде, неустойчивы и сопровождаются их дроблением на нитевидные плазменные каналы диаметром порядка 10 мкм. Установлено, что данный эффект в дальнейшем приводит к развитию сложной нитевидной микроструктуры у растущих анодо-направленных и катодно-направленных искровых каналов. Анализ динамики микроструктуры искровых каналов во времени и в пространстве показал, что с течением времени (отсчитываемого от момента пробоя промежутка) количество микроканалов плазмы в объеме разряда возрастает до нескольких десятков.

Отмечено, что скорость роста микроканалов с электродов может достигать  $\sim 10^8 - 10^9 \text{ см/с}$ , то есть быть заметно выше характерной скорости

расширения приэлектродной плазмы на катоде и аноде. Разработанный подход к получению количественных данных о характеристиках одиночных филаментов показал, что последние обладают электронной плотностью  $\sim(1-5)\times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , свидетельствующей о достижении почти полной диссоциации и однократной ионизации молекул воздуха в объеме разряда, занятого результирующей искрой.

Отмечено, что механизм роста филаментов и их возникновения требует детального исследования и, вероятно, связан с развитием ионизационных неустойчивостей в приэлектродных областях на стадии генерации приэлектродной плазмы высокой степени ионизации. Высказано предположение, что наблюдаемый эффект мелкомасштабной искровой филаментации фундаментален и представляет собой субпроцесс более общего процесса контракции импульсного наносекундного разряда в газе.

В заключение второй части третьей главы указана решающая роль пространственного разрешения используемой оптики в диагностической системе для надежной визуализации мелкомасштабных плазменных формирований. Отмечено, что именно высокое пространственное разрешение оптики и короткая длительность зондирующих лазерных импульсов позволили запечатлеть формирование микроструктуры как у встречных искровых каналов, так и у одиночных анодо-направленных искровых каналов, что было недоступно ранее для широко используемых методов диагностики плазмы.

В **заключение** диссертации сформулированы основные результаты проделанной работы:

1. Реализовано решение проблемы жесткой синхронизации (с точностью на уровне одной наносекунды) высоковольтного оборудования и пикосекундного лазера на основе использования разрядника с лазерным поджигом.

2. Разработана диагностическая система на основе методов лазерного зондирования плазмы. Система включает в себя одновременную регистрацию лазерных интерферограмм, тенеграм, и шпирен изображений с высоким

пространственным (до 3 мкм) и временным (при субнаносекундном времени экспозиции кадров и скважности кадров на уровне 1–2 нс) разрешением.

3. Разработаны подходы к численной обработке лазерных интерферограмм.

4. Исследована эволюция первичной прикатодной и прианодной плазмы высокой степени ионизации в микромасштабах поверхности электродов, генерируемой на временах, сравнимых с одной наносекундой. Получены количественные данные о распределении электронной плотности и градиентов электронной плотности приэлектродной плазмы.

5. Уточнена временная корреляция моментов появления приэлектродной плазмы на катоде и аноде относительно момента электрического пробоя разрядного промежутка (сопровождаемого резким ростом тока разряда).

6. Показано, что генерация катодной плазмы носит взрывной характер и приводит к появлению первичных микронных сгустков плазмы с последующим выбросом плазмы части вещества катода.

7. Обнаружено, что за время, соизмеримое с одной наносекундой, прикатодная и прианодная плазма дает старт развитию фронта ионизации, распространяющегося от области первоначального взрыва на катоде и аноде со средней скоростью 70 мкм/нс.

8. Показано, что фронты ионизации, распространяющиеся от областей первоначального взрыва на катоде и аноде, неустойчивы и сопровождаются их дроблением на нитевидные плазменные каналы диаметром порядка 10 мкм. Установлено, что данный эффект в дальнейшем приводит к развитию сложной нитевидной микроструктуры у растущих анодо-направленных и катодо-направленных искровых каналов.

9. Описана динамика измеренных характеристик микроканалов во времени и в пространстве.

10. Отмечена решающая роль пространственного разрешения используемой оптики в лазерной диагностической системе для надежной визуализации мелкомасштабных плазменных формирований.

## Журнальные статьи автора по теме диссертации

[A. 1] Parkevich E. V. The installation to study the pre-breakdown stage of a gas discharge by laser probing // Instruments and Experimental Techniques. — 2017. — Vol. 60, no. 3. — Pp. 383–389.

[A. 2] Study of the prebreakdown stage of a gas discharge in a diode with point cathode by laser probing / E. V. Parkevich, S. I. Tkachenko, A. V. Agafonov et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2017. — Vol. 124, no. 4. — Pp. 531–539.

[A. 3] Anode Plasma Formation at the Initial Stage of a Nanosecond Air Discharge. / E. V. Parkevich, A. I. Khirianova, A. V. Agavonov et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2018. — Vol. 126, no. 3.

[A. 4] Mechanisms responsible for the initiation of a fast breakdown in an atmospheric discharge / E. V. Parkevich, G. V. Ivanenkov, M. A. Medvedev et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2018. — Vol. 27, no. 11. — P. 11LT01.

[A. 5] Fast fine-scale spark filamentation and its effect on the spark resistance / E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, G. V. Ivanenkov et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2019. — Vol. 28, no. 9. — P. 095003.

[A. 6] Extremely fast formation of anode spots in an atmospheric discharge points to a fundamental ultrafast breakdown mechanism / E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, A. I. Khirianova et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2019. — Vol. 28, no. 12. — P. 125007.

[A. 7] Investigation of a Near-Electrode Plasma Formed in the Atmospheric Discharge with Employment of Picosecond Laser Probing / E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, A. I. Khirianova et al. // Journal of Russian Laser Research. — 2019. — Vol. 40, no. 1. — Pp. 56–63.

[A. 8] Laser-triggered gas switch with subnanosecond jitter and breakdown delay tunable over 0.1-10 ns governed by the spark gap ignition angle / E. V. Parkevich,

M. A. Medvedev, A. S. Selyukov et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2020. — Vol. 29, no. 5. — P. 05LT03.

[A. 9] Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions / E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, A. S. Selyukov et al. // Optics and Lasers in Engineering. — 2019. — Vol. 116. — Pp. 82–88.

[A. 10] Khirianova A. I., Parkevich E. V., Medvedev M. A. Analysis and Processing of Spark Channel Interferograms Obtained by Picosecond Laser Interferometry // Journal of Russian Laser Research. — 2019. — Vol. 40, no. 1. — Pp. 48–55.

[A. 11] Algorithm of Interferogram Tracing. I. The Parabola Method: Pros and Cons / A. I. Khirianova, E. V. Parkevich, M. A. Medvedev et al. // Journal of Russian Laser Research. — 2021. — Vol. 42, no. 1. — Pp. 25–31.

[A. 12] Algorithm of Interferogram Tracing. II. Fringes with Negative Curvature and Extended Approach to Their Processing / A. I. Khirianova, E. V. Parkevich, M. A. Medvedev et al. // Journal of Russian Laser Research. — 2021. — Vol. 42, no. 2. — Pp. 161–170.

### **Статьи автора в главах коллективных монографий**

[Б. 1] Е. В. Паркевич, С. И. Ткаченко, А. В. Агафонов, А. Р. Мингалеев, В. М. Романова, Т. А. Шелковенко, С. А. Пикуз. Исследование импульсного наносекундного пробоя в диоде с острым катодом при атмосферном давлении методами лазерного зондирования / Монография под редакцией академика Г. А. Месяца. — М.: Издательство «Печатный салон «Шанс», 2017. Глава 2. — с.27–55.

[Б. 2] Е. В. Паркевич, М. А. Медведев, А. И. Хирьянова, Г. В. Иваненков, А. В. Агафонов. «Исследование ранней стадии формирования искрового канала в атмосферном разряде». / Электрофизические и оптические процессы в плазменных и твердотельных средах и наноструктурах: монография / кол.

авторов; под ред. Г. А. Месяца. — Москва: ООО «РУСАЙНС», 2019. Глава 3. с. 217–233.

### **Тезисы докладов автора в сборниках трудов конференций**

[B.1] Исследование сверхбыстрого формирования анодных пятен в наносекундном атмосферном разряде / Е. В. Паркевич, М. А. Медведев, А. И. Хирьянова и др. // Сборник тезисов докладов XLVII Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород. — 16–20 марта 2020. — С. 157.

[B.2] И. Хирьянова А., В. Паркевич Е., А. Медведев М. Особенности обработки интерферограмм искровых каналов с учётом их пространственной структуры // Сборник тезисов докладов XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород. — 18–22 марта 2019. — С. 183.

[B.3] Возникновение, развитие и филаментация искр в атмосферном разряде / Медведев М. А., Паркевич Е. В., Иваненков Г. В. и др. // Сборник тезисов докладов XLVI Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород. — 18–22 марта 2019. — С. 185.

[B.4] Филаментация токовых каналов в искровой стадии наносекундного разряда в воздухе / Медведев М. А., Паркевич Е. В., Хитько М. А. и др. // Сборник тезисов докладов XLV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород. — 2–6 апреля 2018. — С. 222.

[B.5] Исследование приэлектродных процессов при импульсном разряде в диоде с острым катодом в широком диапазоне давлений методами лазерного зондирования / Е. В. Паркевич, С. И. Ткаченко, А. В. Агафонов и др. // Сборник тезисов докладов XLV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород. — 13–17 февраля 2017. — С. 224.

[B.6] Хирьянов Т. Ф., Хирьянова А. И., Паркевич Е. В. Программные решения для эффективного анализа интерференционных изображений плазменных объектов // Сборник тезисов докладов Школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО), Россия, Москва. — 24–26 ноября 2020. — С. 89.

[B.7] Исследование влияния угла поджига лазерно-искрового разрядника на его коммутационные характеристики / Паркевич Е. В., Медведев М. А., Хирьянова А. И., Огинов А. В. // Сборник тезисов докладов Школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» (БПИО), Россия, Москва. — 12–14 ноября 2019. — С. 60–65.

[B.8] Optical registration of fine-structured electrical sparks / A. I. Khirianova, E. V. Parkevich, M. A. Medvedev, A. V. Oginov // V International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2021, Lebedev Physical Institute, Russia, Moscow. — October 4-8, 2021. — P. 34.

[B.9] Comprehensive study of the wave-scattering problem applied to fine-structured electrical sparks visualized via laser probing techniques / Khirianova A. I., Parkevich E. V., Medvedev M. A., Oginov A. V. // IV International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2020, Lebedev Physical Institute, Russia, Moscow. — September 28–October 2, 2020. — P. 78.

[B.10] Smaznova K. T., Parkevich E. V. Interferometry in the study of the dynamics of a spark discharge in air in the point-plane gap // Book of abstracts, XXXVI International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus. — March 1–6, 2021. — P. 281.

[B.11] Filamentary instability and its role in the spark discharge formation in an atmospheric discharge / Parkevich E. V., Ivanenkov G. V., Medvedev M. A. et al. // Book of abstracts, XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy

Fluxes with Matter, Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus. — March 1–6, 2019. — P. 340.

[B.12] Cathode explosion gives rise to the spark channel development during the discharge formation in air / Medvedev M. A., Parkevich E. V., Ivanenkov G. V. et al. // Book of abstracts, XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter, Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus. — March 1–6, 2019. — P. 341.

[B.13] A. Medvedev M., V. Parkevich E., V. Oginov A. Laser-triggered gas switch for precise electrophysical experiments // Book of abstracts, XXXV International Conference on Equations of State for Matter, Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus. — March 1–6, 2020. — P. 312.

[B.14] Investigation of microstructure of current channels in nanosecond air discharge by laser probing methods / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Oginov A. V. et al. // Book of abstracts, XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, Russia, Kabardino-Balkaria, Elbrus. — March 1–6, 2018. — P. 357.

[B.15] Investigation of initiation, development, and filamentation of sparks in an atmospheric discharge by using multi-frame laser probing / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Agafonov A. V. et al. // Abstract book, Advances and Applications in Plasma Physics (AAPP-2019), Russia, St. Petersburg. — September 18–20, 2019. — P. 85.

[B.16] Хирьянов Т. Ф., Хирьянова А. И., Паркевич Е. В. Алгоритмы поиска трасс интерференционных полос при обработке результатов интерферометрии микронных плазменных объектов // Сборник тезисов докладов Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020), Россия, Казань. — 9–13 ноября 2020. — С. 125.

[B.17] Паркевич Е. В., Ткаченко С. И., Агафонов А. В. Исследование приэлектродных процессов в импульсном наносекундном разряде в диоде с острым катодом методами лазерного зондирования // Сборник тезисов

докладов Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2017), Россия, Казань. — 5–9 июня 2017. — С. 65.

[B.18] Искры с нитевидной микроструктурой и фундаментальные проблемы их оптической регистрации / Е. В. Паркевич, А. И. Хирьянова, М. А. Медведев et al. // Abstracts of the 19<sup>th</sup> International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Russia, Moscow. — September 15–17, 2020. — Pp. 30–31.

### Список литературы

[1] Инжекционная газовая электроника / Ю. И. Бычков, Ю. Д. Королев, Г. А. Месяц и др. — Новосибирск: Наука, 1982. — 240 с.

[2] Д. Королев Ю., А. Месяц Г. Физика импульсного пробоя газов. — М.: Наука, 1991. — 224 с.

[3] Streamer-to-spark transition initiated by a nanosecond overvoltage pulsed discharge in air / Lo A., Cessou A., Lacour C. et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2017. — Vol. 26, no. 4. — P. 045012.

[4] Time-resolved optical emission spectroscopy of nanosecond pulsed discharges in atmospheric-pressure N<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures / R. M. Van der Horst, T. Verreycken, E. M. Van Veldhuizen, P. J. Bruggeman // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2012. — Vol. 45, no. 34. — P. 345201.

[5] A nanosecond surface dielectric barrier discharge at elevated pressures: time-resolved electric field and efficiency of initiation of combustion / I. N. Kosarev, V. I. Khorunzhenko, E. I. Mintousov et al. // Plasma Sources Science and Technology. — 2012. — Vol. 21, no. 4. — P. 045012.

[6] The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology / Igor Adamovich, S. D. Baalrud, Anemie Bogaerts et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2017. — Vol. 50, no. 32. — P. 323001.

[7] Mesyats G. A. Pulsed power. — Springer Science & Business Media, 2007. — 568 pp.

- [8] Energy efficiency in nanoscale synthesis using nanosecond plasmas / Z. Pai, David, Kostya Ken Ostrikov, Shailesh Kumar et al. // Scientific reports. — 2013. — Vol. 3, no. 1. — Pp. 1–7.
- [9] Mylnikov D., Efimov A., Ivanov V. Measuring and optimization of energy transfer to the interelectrode gaps during the synthesis of nanoparticles in a spark discharge // Aerosol Science and Technology. — 2019. — Vol. 53, no. 12. — Pp. 1393–1403.
- [10] Дыхне А. М., Напартович А. П. О приэлектродной неустойчивости плазмы газового разряда // ДАН. — 1979. — Т. 247, № 4. — С. 837–840.
- [11] Near-anode instability of gas flow glow discharge / Yu. S. Akishev, A. M. Volchek, A. P. Napartovich, N. I. Trushkin // Plasma Sources Science and Technology. — 1992. — Vol. 1, no. 3. — P. 190.

Паркевич Егор Вадимович

Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном  
искровом разряде в воздухе

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать «\_\_\_»\_\_\_\_\_ 2022 года. Заказ № \_\_\_ Формат  
60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз. Типография \_\_\_\_\_