

Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки
Объединенный
институт
высоких
температур
Российской
академии наук



Объединенный
ИВТ РАН

125412, Москва
ул. Ижорская, 13, стр. 2
тел.: +7 (495) 485-83-45
факс: +7 (495) 485-99-22

21.06.22 № 11402 -56-21719

На № _____

УТВЕРЖДАЮ
Директор ОИВТ РАН
академик О.Ф. Петров



" 06 2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), на диссертационную работу **Паркевича Егора Вадимовича** «Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном искровом разряде в воздухе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

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

Актуальность темы диссертации связана с развитием научного знания о механизмах быстрой генерации высокоионизованной плазмы в газовом разряде.

Физические явления, обсуждаемые в рамках диссертационной работы, затрагивают многие аспекты в области физики газового разряда. В частности, обсуждается проблема описания неустойчивости развития приэлектродной плазмы, появления фронтов мощной ионизации в разряде, неустойчивость развития токовых каналов, вследствие которой последние формируются в виде множества микроканалов. Фактически, данные явления тесно связаны с одним более общим эффектом – контракцией импульсного наносекундного разряда в газе. Данный эффект активно исследуется многими научными группами еще с 60-ых годов прошлого века. Большую роль в расширении научного знания в этой теме сыграли работы академика Г. А. Месяца и его коллег, что хорошо отражено в обширной литературе. В современных исследованиях интерес к физическим явлениям, сопровождающих формирование импульсного наносекундного разряда в газе, обусловлен уточнением представлений о кинетике процессов в газовом разряде для развития соответствующих приложений. На сегодняшний день ключевой трудностью описания процессов формирования разряда является отсутствие данных о динамике плазмы, генерируемой в микромасштабах разряда на субнаносекундных временах. Характеристики плазмы и её эволюция на таких временах и масштабах до сих пор мало исследованы, что

связано в первую очередь с принципиальной трудностью диагностики быстро эволюционирующей плазмы, а также ограниченностью классических широко используемых техник диагностики плазмы.

Научная новизна диссертационной работы связана с экспериментальными исследованиями характеристик и динамики плазмы высокой степени ионизации на временах, сравнимых с одной наносекундой, и масштабах порядка единиц микрон как в приэлектродных областях, так и в объеме всего разряда. Предложенные в работе диагностики плазмы основаны на использовании методов многокадрового лазерного зондирования. Отметим, что методы лазерного зондирования сами по себе не являются новыми и активно используются для диагностики плазмы еще с момента создания первых лазеров в 60-ых годах. Однако автором были развиты оптические системы, которые по своему функционалу можно отнести к существенным достижениям.

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

Научная и практическая значимость работы состоит в получении новых знаний о быстропотекающих 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.

Рекомендации по использованию результатов и выводов работы

Полученные в диссертационной работе новые данные об особенностях формирования импульсного наносекундного разряда в газе, а также развитые техники диагностики плазменных формирований с высоким пространственным и временным разрешением, представляют несомненный интерес для специалистов в области физики газового разряда, горения, твердого тела, в том числе специалистов, занимающихся разработкой диагностик быстро живущих малоразмерных фазовых объектов.

С полученными результатами целесообразно ознакомить следующие организации: Московский государственный университет, Санкт-Петербургский государственный университет, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Институт электрофизики Уральского отделения РАН, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Новосибирский государственный технический университет, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет, НИЦ Курчатовский Институт, Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики и др.

Диссертационная работа Паркевича Егора Вадимовича **по содержанию и структуре** отвечает научно-квалификационной работе на соискание ученой степени кандидата наук.

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

Во **введении** приведен обзор научной литературы по теме диссертационной работы, обоснована актуальность исследований, сформулированы цель и задачи исследований, проведен анализ научной новизны полученных результатов и оценена их практическая значимость, сформулированы защищаемые положения, указаны сведения об апробации работы и её достоверности.

Первая глава диссертации посвящена технической реализации диагностики плазмы с высоким временным и пространственным разрешением. Реализовано решение проблемы жесткой синхронизации высоковольтного оборудования и источника лазерного излучения. Описана схема установки, использующей часть лазерного излучения для запуска высоковольтного генератора с точностью на уровне одной наносекунды. Обсуждаются нюансы техники многокадрового фотографирования плазмы с использованием методов лазерного зондирования. Разработана система одновременной съёмки лазерных теневых, интерференционных и шпирен изображений плазмы с пространственным разрешением на уровне единиц микрон.

Вторая глава описывает разработанный подход по 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 и электронной плотности плазмы по измеренному сдвигу фазы излучения при малой аккумуляции ошибки численного счета.

В **третьей главе** представлены основные полученные результаты. Глава условно разделена на два ключевых раздела, которые посвящены ранней и поздней стадиям развития искровых каналов в импульсном наносекундном разряде в воздухе. Ранняя стадия касается генерации приэлектродной плазмы высокой степени ионизации на катоде и аноде. Поздняя стадия затрагивает проблему формирования микроструктуры у одиночных искровых каналов.

В *первой части третьей главы* изложены 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.

Показано, что генерация катодной плазмы носит взрывной характер и приводит к появлению первичных микронных сгустков плазмы с последующим выбросом плазмы части вещества катода. 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 7×10^6 см/с.

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 ($10^{19} - 10^{20}$ см⁻³) и градиентов электронной плотности ($10^{22} - 10^{23}$ см⁻⁴) 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. 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. Обнаружено, 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 7×10^6 см/с.

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.

Скорость роста микроканалов с электродов может достигать 10^8 – 10^9 см/с, что 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 $(1-5) \times 10^{19}$ см⁻³, свидетельствующей о достижении почти полной диссоциации и однократной ионизации молекул воздуха в объеме разряда, занятого 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 зарегистрировать формирование микроструктуры как у встречных искровых каналов, так и у одиночных анодо-направленных искровых каналов, что было недоступно ранее.

В заключении диссертации сформулированы основные результаты работы.

При общей положительной высокой оценке работы по тексту диссертации имеются следующие замечания:

1. Сравнения сигналов напряжения и тока с делителя напряжения и токового шунта с калибровочными сигналами представлены для интервала времени 4 нс. В тесте указано, что длительность импульса напряжения составляет около 40 нс, и соответственно в диссертации на рис. 23 приведены импульсы тока и напряжения длительностью до 40 нс. Для емкостного делителя обычно приводят не только характеристики фронта нарастания, но и спад напряжения, или указывают соответствующую величину RC, однако в тексте этого нет. Резистивный токовый шунт греется протекающим током, вследствие чего его характеристики при измерении длинных импульсов могут меняться. Автору следовало указать характеристики шунта для всего диапазона измеряемых времен.

2. Для создания концентрации электронов 10^{20} см⁻³ требуется значительный энерговклад в плазменный канал, которого из данных тока и напряжения на рис. 23 для плазменного столба диаметром 100 мкм недостаточно. Автору следовало оценить удельный энерговклад в искровые каналы.

3. Для высоких концентраций электронов и ионов 10^{20} см^{-3} и сравнительно низких температур 1 эВ плазма будет слабонеидеальной. Повлияет ли слабая неидеальность на диэлектрическую проницаемость плазмы, величина которой необходима для измерений?

4. В тексте довольно много употребляется слов из английского языка, таких как, "триггируемый генератор", "схема триггирования", "коннектор", "дизайн разрядника" и др., для которых в русском языке есть ясные термины "схема запуска", "устройство разрядника" и т.д.

Несмотря на перечисленные недостатки, в целом работа выполнена на хорошем экспериментальном уровне, вносит существенный вклад в понимание физики импульсного наносекундного разряда в воздухе, а также развивает высокоэффективные способы диагностики плазмы.

Основные результаты диссертационной работы **опубликованы** в двух коллективных монографиях, а также в двенадцати журнальных статьях, рекомендованных ВАК и входящих в базы данных Scopus и Web of Science. Результаты работы **представлялись и докладывались** автором на шестнадцати Международных и Всероссийских конференциях. Во введении и каждой главе диссертационной работы автор разъясняет свой личный вклад в представленные в диссертации результаты. Постановка всех задач и цели исследований, анализ результатов и выводы были сделаны непосредственно автором работы.

Диссертационная работа Паркевича Е.В. была заслушана, обсуждена и одобрена на семинаре ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова (Протокол № 14 от 08 июня 2022 года).

С учётом всего вышесказанного, считаем, что выводы диссертационной работы научно обоснованы и не вызывают сомнений. Результаты достаточно полно опубликованы в виде журнальных статей и представлены в докладах на конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа "Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном искровом разряде в воздухе" представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 07.06.2021 г.), а ее автор Паркевич Е.В. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «физика плазмы».

Отзыв составил

главный научный сотрудник лаб 17.1 плазменно-пылевых процессов ОИВТ РАН
д.ф.-м.н., профессор



Василяк Леонид Михайлович

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-82-44, vasilyak@ihed.ras.ru

Ученый секретарь ОИВТ РАН
д.ф.-м.н., ст.н.с.



Амиров Р.Х.

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-82-44, amirovravil@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, (495) 485-82-44, webadmin@ihed.ras.ru

Список основных работ ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

1. V.A. Panov, L.M. Vasilyak, S.P. Vetchinin, V.Ya. Pecherkin, E.E. Son. Pulsed electrical breakdown of conductive water with air bubbles. *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 28, No. 8, p. 085019 (2019).
2. В.Ф. Тарасенко, Г.В. Найдис, Д.В. Белоплотов, Д.А. Сорокин, М.И. Ломаев, Н.Ю. Бабаева. Измерение и моделирование скорости стримера при пробое воздуха в резко неоднородном электрическом поле. *Физика плазмы*, Том 46, Выпуск 3, с. 273-280 (2020).
3. В.Ф. Тарасенко, Г.В. Найдис, Д.В. Белоплотов, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, Н.Ю. Бабаева. Стримерный пробой воздуха атмосферного давления в неоднородном электрическом поле при высоких перенапряжениях. *Известия высших учебных заведений. Физика*, Том 61, Выпуск 6, с. 119-125 (2018).
4. В.Ф. Тарасенко, Г.В. Найдис, Д.В. Белоплотов, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, Н.Ю. Бабаева. Формирование широких стримеров при субнаносекундных разрядах в воздухе атмосферного давления. *Физика плазмы*, Том 44, Выпуск 8, с. 652-660 (2018).
5. N.Yu. Babaeva, G.V. Naidis. Control of plasma jet dynamics by externally applied electric fields. *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 30, No. 9, p. 095003 (2021).
6. N.G.C. Ferreira, G.V. Naidis, M.S. Benilov. Simulation of pre-breakdown discharges in high-pressure air: II. Effect of surface protrusions. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 54, No. 25, p. 255203 (2021).
7. Elena A. Filimonova, Anastasia S. Dobrovolskaya, Aleksey N. Bocharov, Valentin A. Bityurin, George V. Naidis. Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a non-uniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine. *Combustion and Flame*, Vol. 215, p. 401-416 (2020).
8. Naidis G.V., Tarasenko V.F., Babaeva N.Yu., Lomaev M.I. Subnanosecond breakdown in high-pressure gases. *Plasma Sources Science and Technology*, Vol. 27, No. 1, p. 013001 (2018).
9. N.G.C. Ferreira, D.F.N. Santos, P.G.C. Almeida, G.V. Naidis, M.S. Benilov. Simulation of pre-breakdown discharges in high-pressure air. I: The model and its application to corona inception. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 52, No. 35, p. 355206 (2019).
10. I. Selivonin, C. Ding, S. Starikovskaia, I. Moralev. The effect of the exposed electrode oxidation on the filamentation thresholds of a nanosecond DBD. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1698, No. 1, p. 012028 (2020).