ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.023.02 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело №\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 12 сентября 2022 г. № 54

О присуждении Паркевичу Егору Вадимовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном искровом разряде в воздухе» по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы» принята к защите 16 мая 2022 года (протокол заседания №52) диссертационным советом Д002.023.02, созданным 9 ноября 2012 года 717/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Паркевич Егор Вадимович, 25 декабря 1993 года рождения, в 2011 г. поступил на факультет проблем физики и энергетики (ФПФЭ) Московского физико-технического института (МФТИ). В 2017 г. получил диплом магистра с отличием по специальности 03.04.01 «Прикладные математика и физика» по профилю образовательной программы: «Электрофизика». В 2017 году 01 сентября был принят в аспирантуру МФТИ по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 01.04.08 «Физика плазмы». Сдал кандидатские экзамены и закончил аспирантуру 10 июля 2021 года. Работал в отделе физики высоких плотностей энергии ОЯФА ФИАН с осени 2014 г. С января 2015 г. был принят на должность инженера 2-й категории. С 2017 г. по настоящее время работает в должности высококвалифицированного младшего научного сотрудника в отделе физики высоких плотностей энергии ОЯФА ФИАН.

Диссертационная работа Паркевича Егора Вадимовича «Генерация плазмы высокой степени ионизации в наносекундном искровом разряде в воздухе», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук выполнена в Отделе физики высоких плотностей энергии Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук.

Научный руководитель: Пикуз Сергей Александрович, доктор физ.-мат. наук, высококвалифицированный главный научный сотрудник Отдела физики высоких плотностей энергии Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук (ФИАН РАН).

Научный консультант: Огинов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник Отдела физики высоких плотностей энергии Отделения ядерной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук (ФИАН РАН).

Официальные оппоненты:

1. Леонов Алексей Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Прикладной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»;

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

положительно охарактеризовали диссертационную работу.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), город Москва, представила отзыв, составленный главным научным сотрудником лаборатории плазменно-пылевых процессов ОИВТ РАН доктором физико-математических наук профессором Василяком Леонидом Михайловичем, подписанный ученым секретарём ОИВТ РАН доктором физико-математических наук старшим научным сотрудником Амировым Равилем Хабибуловичем и утвержденный директором ОИВТ РАН академиком Петровым Олегом Федоровичем на основании заключения семинара ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова (Протокол №14 от 8 июня 2022 года), в котором указано, что соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук.

Соискатель имеет 24 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 12 работ, их них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликовано 12 работ. Результаты по теме диссертации изложены в 2 коллективных монографиях, а также докладывались на 16 Международных и Всероссийских конференциях.

В диссертации не содержатся недостоверные сведения об опубликованных соискателем Е.В. Паркевичем работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

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.

2. Anode Plasma Formation at the Initial Stage of a Nanosecond Air Discharge. / Parkevich E. V., Khirianova A. I., Agafonov A. V., Tkachenko S. I., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A., Oginov A. V., Pikuz S. A. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2018. — Vol. 126, no. 3.

3. Mechanisms responsible for the initiation of a fast breakdown in an atmospheric discharge / Parkevich E. V., Ivanenkov G. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Mingaleev A. R., Shelkovenko T. A., Pikuz S. A. // Plasma Sources Science and Technology. — 2018. — Vol. 27, no. 11. — P. 11LT01.

4. Fast fine-scale spark filamentation and its effect on the spark resistance / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Ivanenkov G. V., Khirianova A. I., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Korneev Ph. A., Gus'kov S. Y., Mingaleev A. R. // Plasma Sources Science and Technology. — 2019. — Vol. 28, no. 9. — P. 095003.

5. Extremely fast formation of anode spots in an atmospheric discharge points to a fundamental ultrafast breakdown mechanism / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Khirianova A. I., Ivanenkov G. V., Selyukov A. S., Agafonov A. V., Shpakov K. V., Oginov A. V. // Plasma Sources Science and Technology. — 2019. — Vol. 28, no. 12. — P. 125007.

6. Setup involving multi-frame laser probing for studying fast plasma formation with high temporal and spatial resolutions / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Selyukov A. S., Khirianova A. I., Mingaleev A. R., Mishin S. N., Pikuz S.A., Oginov A. V. // Optics and Lasers in Engineering. — 2019. — Vol. 116. — Pp. 82–88.

7. Laser-triggered gas switch with subnanosecond jitter and breakdown delay tunable over 0.1-10 ns governed by the spark gap ignition angle / Parkevich E. V., Medvedev M. A., Selyukov A. S., Khirianova A. I., Mingaleev A. R., Oginov A. V. // Plasma Sources Science and Technology. — 2020. — Vol. 29, no. 5. — P. 05LT03.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у них признанных достижений в области физики плазмы.

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

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1) Разработан комплекс диагностик импульсной плазмы, включающий в себя высоковольтный генератор, синхронизованный с пикосекундным лазером с точностью ~1 нс; системы многокадрового фотографирования плазмы с использованием методов лазерного зондирования; системы одновременной съёмки лазерных теневых, интерференционных и шлирен изображений плазмы с пространственным разрешением до 3 мкм.

2) Разработаны 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~1019–1020 см–3 и *T*e~1–5 эВ, а показатель преломления плазмы связан с концентрацией электронов в рамках приближения идеальной плазмы; приэлектродная плазма может быть непрозрачной, иметь электронную плотность выше 1020 см–3 и быть многокомпонентной, состоять из ионизованных молекул и атомов воздуха и электрода.

4) Момент перехода разряда в сильноточный режим с субнаносекундной точностью совпадает с моментом появления прикатодной и прианодной плазмы с электронной плотностью *n*e~1019–1020 см-3 и градиентами электронной плотности ∼1022−1023 см-4; генерация катодной и прианодной плазмы носит взрывной характер, приводит к появлению первичных сгустков плазмы размером ~10 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 ~1 нс прикатодная и прианодная плазма дают старт развитию фронтов ионизации, распространяющихся со средней скоростью 7×106 см/с и создающих плазму в промежутке с электронной плотностью выше *n*e~1019 см-3.

5) Фронты ионизации, распространяющиеся от областей первоначального взрыва на катоде и аноде, неустойчивы и сопровождаются их дроблением на нитевидные плазменные каналы диаметром ~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 ∼108−109 см/с, что заметно выше характерной скорости расширения приэлектродной плазмы на катоде и аноде; электронная плотность плазмы одиночных микроканалов может составлять ∼(1−5)×1019 см-3, что свидетельствует о достижении почти полной диссоциации и однократной ионизации молекул воздуха.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Паркевича Е.В., получены лично автором либо при его непосредственном участии, являются оригинальными и научно обоснованными.

Научная новизна результатов, представленных автором, заключается в том, что:

– 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.

– Обнаружено, 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.

– Впервые получены данные о характеристиках микроструктуры искровых каналов и её динамике во времени и в пространстве.

Достоверность полученных соискателем результатов подтверждается тестированием численной обработки лазерных интерферограмм на примере решения модельных задач, калибровкой измерительной и диагностической аппаратуры, детальным анализом механизмов визуализации плазмы в поле лазерного излучения, общей систематикой полученных экспериментальных данных и их сравнением с результатами работ других авторов.

Научная и практическая значимость работы состоит в получении новых знаний о быстропротекающих процессах в импульсном наносекундном разряде в воздушной среде, связанных с инициированием и развитием искровых каналов с высокой степенью ионизации плазмы. Полученные в работе новые данные об особенностях формирования импульсного наносекундного разряда в воздухе при атмосферном давлении, а также разработанные техники диагностики плазменных формирований с высоким пространственным и временным разрешением, могут быть полезны для развития новых методов контроля параметров газоразрядных систем, в которых используется или возникает эффект контракции газового разряда.

Результаты диссертационной работы Паркевича Е.В. рекомендуются к использованию в Московском государственном университете, Санкт-Петербургском государственном университете, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Институте электрофизики Уральского отделения РАН, Институте сильноточной электроники Сибирского отделения РАН, Московском физико-техническом институте (национальный исследовательский университет), Новосибирском государственном техническом университете, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Национальном Исследовательском Томском Политехническом университете, НИЦ Курчатовском Институте и др.

В ходе защиты соискатель Паркевич Е.В. аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 12 сентября 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Е. В. Паркевичу учёную степень кандидата физико-математических наук за создание передовой системы лазерного фотографирования плазмы с высоким временным и пространственным разрешением, а также за обнаружение с её использованием ранее неизвестных особенностей быстрой генерации сильноионизованной плазмы во время развития наносекундного искрового разряда в воздухе.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 19 человек, из них 7 докторов и 1 кандидат наук по специальности рассматриваемой диссертации (01.04.08 – Физика плазмы), участвовавшие в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени - 19,

против присуждения учёной степени - нет,

недействительных бюллетеней - нет.

Председатель диссертационного совета Д 002.023.02,

доктор физ.-мат. наук,

член-корреспондент РАН П. И. Арсеев

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.023.02

кандидат физ.-мат. наук К. Ю. Вагин

12 сентября 2022 г.