

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Паркевича Егора Вадимовича по теме «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 Паркевича Е.В. посвящена экспериментальным исследованиям особенностей генерации плазмы высокой степени ионизации во время развития импульсного наносекундного искрового разряда в воздухе при атмосферном давлении. Основной целью работы является получение новых знаний о быстропротекающих процессах в импульсном наносекундном разряде в газе, сопровождающих инициирование и развитие искровых каналов. Основным методом экспериментальной работы было быстрое многокадровое фотографирование плазмы на основе методов лазерного зондирования. Для исследования динамики развития плазменных формирований в разряде использовались шесть лазерных пучков, которые зондировали исследуемый разрядный промежуток с одновременной регистрацией интерферограмм, теневых и шпирен-изображений. Задачи, поставленные и реализованные в работе, потребовали достижения пространственного разрешения 3-4 мкм и синхронизации с высоковольтным импульсом генератора на уровне 1 нс, что является высочайшим требованием к используемой технике эксперимента. Диссертанту удалось решить задачу жесткой и в то же время регулируемой синхронизации высоковольтного оборудования и источника лазерного излучения.

Тема представленной диссертации, несомненно, является актуальной, так как результаты изучения сильноточного газового разряда представляют интерес и для понимания физики искровых пробоев, и для перспективных приложений, таких как объёмный искровой поджиг горючих смесей, наработка порошков нанометровых размеров.

Структурно диссертация состоит из введения, трех глав и заключения.

Во введении автором сделан обзор научной литературы по теме диссертационной работы, обозначены цели и задачи исследования, кратко обосновывается актуальность тематики проведенной работы, излагается основное содержание трех глав, рассматривается научная и практическая значимость работы и формулируются выносимые на защиту положения.

В первой главе диссертации приведено подробное описание техники эксперимента, оптических систем диагностики плазмы, системы синхронизации

высоковольтного генератора и пикосекундного лазера, схемы одновременной регистрации лазерных интерферограмм, тенеграм и шпирен изображений.

Во второй главе представлен подход к обработке интерферограмм, включающий в себя предобработку интерферограмм (шумоподавление), поиск точек максимумов и минимумов интенсивности, построение трасс интерференционных полос, извлечение карты сдвига фазы. Для множества нескольких осесимметричных объектов предложен способ обработки, основанный на разбиении общей интерферограммы на части, имеющие решение обратной задачи Абеля. Обсуждены достоинства разработанного подхода, его точность, используемые приближения.

В третьей главе обсуждаются результаты исследований генерации прикатодной и прианодной плазмы в течение первых наносекунд после наступления электрического пробоя промежутка. Разработанная автором система быстрой фотосъёмки плазмы позволила получить соответствующие изображения с высоким пространственным (до 3 мкм) и временным разрешением при субнаносекундном времени экспозиции кадров (70 пс) и с задержкой между кадрами на уровне 1–2 нс. Впервые были измерены диаметры плазменных микроканалов, концентрация электронов в них, скорости их прорастания от катода к аноду. Была оценена пропускная способность нитевидной микроструктуры искрового канала для электрического тока. Прослежена связь взрывных процессов на электродах с развитием фронтов ионизации, распространяющихся от области первоначального взрыва на катоде, провоцирующих впоследствии формирование сложной нитевидной микроструктуры искровых каналов возле катода и анода. Измерена погонная плотность электронов возле катода в момент пробоя, что позволило оценить его эмиссионную способность. Анализируются оптические и прочие характеристики приэлектродной плазмы, её динамика во времени и в пространстве. Проанализированы механизмы поглощения и преломления света на искровых каналах. В результате анализа был сделан вывод, что наблюдаемые эффекты вблизи электродов могут быть объяснены только наличием многокомпонентной смеси из материала электродов. Обнаруженная тонкая микроструктура искрового разряда свидетельствует о высоких плотностях тока и энерговклада в газовую среду, которые обосновывают высокую степень ионизации плазмы и возможность развития плазменных неустойчивостей. Показано, что формирование сложной нитевидной микроструктуры у искрового канала слабо зависит от используемой геометрии разрядного промежутка, что говорит о фундаментальности этого явления.

Прежде всего, следует отметить вклад автора диссертационной работы в развитие техники диагностики, которая заключается в разработке и создании

многофункционального диагностического комплекса для исследования плазмы, позволяющего одновременно регистрировать лазерные интерферограммы, тенеграммы, шпирен изображения для каждого из шести зондирующих лазерных пучков. Именно этот диагностический комплекс позволил установить качественно новую микроканальную структуру искрового разряда, с характерным размером 10 мкм.

Все основные результаты диссертационной работы, несомненно, обладают новизной, научной и практической значимостью и могут рассматриваться как существенный вклад в экспериментальную физику газового разряда.

Достоверность содержащихся в диссертации результатов подтверждается высоким уровнем и качеством постановки экспериментов, детальным анализом механизмов визуализации плазмы в поле лазерного излучения, контролем численной обработки лазерных интерферограмм, общей систематикой полученных результатов. Представленные в диссертационной работе результаты находятся в согласии с результатами, полученными независимыми экспериментальными группами, занимающимися тематикой импульсного наносекундного разряда в газе.

Результаты диссертационной работы широко представлены научной общественности в виде публикаций в ведущих научных изданиях и докладов на международных и всероссийских конференциях.

К представленной работе есть следующие замечания:

1. Терминология. Неправильно употребляется термин скважность, не имеющий размерности (с. 12, 96). Не везде правильно используется термин «линейная плотность», применяющийся в русском языке преимущественно к одномерным объектам (нитям). Так для описания прикатодной плазмы (с. 69) следует использовать термин «погонная плотность» (плазмы), а не вышеупомянутый англицизм. То же на с.37: лучше по-русски употреблять термин «шторка» или «затвор», чем английское «шатер». На с. 53 вместо «точка перегиба функции» должно быть написано «точка экстремума функции».

2. При наличии десятка микроканалов, визуализируемых при просвечивании искры в одном направлении, в ортогональном направлении в условиях осевой симметрии эксперимента следует ожидать такое же их количество (см. рис. 29). Неизбежное перекрытие микроканалов в направлении наблюдения порождает сомнение в корректности алгоритма восстановления плотности заряда для множества отдельных осесимметричных образований в центральной приосевой области. Корректно размеры каналов можно восстановить только для слабо перекрывающихся периферийных филаментов, что, конечно, может служить оценкой и для всех остальных.

Список основных работ оппонента, Данько С.А., по специальности защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

- 1) О. С. Белозеров, С. А. Данько, С. С. Ананьев. Методика наблюдения за динамикой фокусировки электронного пучка в эксперименте по ускорению ионов на генераторе РЭП // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. – 2020. – Т. 43. – №. 2. – с. 80–86. http://vant.iterru.ru/vant_2020_2/9.pdf
- 2) E. Skladnik-Sadowska, S. A. Dan'ko, A. M. Kharrasov, V. I. Krauz, R. Kwiatkowski, M. Paduch, M. J. Sadowski, D. R. Zaloga, and E. Zielinska. Influence of gas conditions on parameters of plasma jets generated in the PF-1000U plasma-focus facility. *Physics of Plasmas*, 25, 082715 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5045290>
- 3) О.С. Белозеров, С.А. Данько, С.А. Хромов. К механизму ускорения ионов релятивистским электронным пучком // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2021. Т. 44. № 1. С. 136-144. http://vant.iterru.ru/vant_2021_1/12.pdf.
- 4) Dan'ko S. A., Ananyev S. S., Kalinin Yu. G., Krauz V. I., Myalton V. V. Spectroscopic studies of the parameters of plasma jets during their propagation in the background plasma on the PF-3 facility, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **59** (2017) 045003, <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5904>.
- 5) О.С. Белозеров, Ю.Л. Бакшаев, С.А. Данько. Эксперименты по ускорению ионов в диоде генератора РЭП «Кальмар»// *Физика плазмы*, 2019, том 45, № 6, с.538-546. <https://rdcu.be/bHnVN>.