

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физического института имени
П.Н.Лебедева Российской академии
наук

д.ф.-м.н. С. Ю. Савинов



05 2017 г.

ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертационную работу
Ефимова Александра Валерьевича «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ
КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА
МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ
РАЗРЯДОВ», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы**

Диссертационная работа Ефимова А. В. посвящена развитию комплекса спектральных и визуальных методов диагностики нестационарной пространственно-неоднородной многокомпонентной плазмы. В качестве объекта исследования автором был выбран импульсный капиллярный эрозионный разряд. Основные задачи экспериментального исследования состояли в получении комплексных данных о пространственно-временных изменениях основных излучательных свойств эрозионной струи и её плазменных параметров в диапазоне удельных энерговкладов $2,5 \div 35$ МВт/см³, который охватывает как дозвуковой, так и сверхзвуковой режимы истечения струи, и определение, на основе выполненных измерений, параметров состояния (температуры, давления, степени ионизации) плазмы в формируемой разрядом дозвуковой и сверхзвуковой плазменной струе. Импульсные разряды дают возможность достигнуть высоких удельных энергетических параметров при относительно небольших энергозатратах. Кроме того, нестационарные процессы плазмообразования, свойственные импульсным разрядам, позволяют управлять

свойствами плазмы и могут быть использованы для решения целого ряда прикладных задач. Однако, в таких разрядах состояние плазмы может существенно изменяться в пределах разрядной области. Это обстоятельство, а также быстротечность процессов, формирующих импульсные разряды, осложняет диагностику объектов и требует разработки адекватных методов исследования. К наиболее перспективным и информативным относятся спектральные и оптические методы диагностики. В этой связи диссертационная работа Ефимова А. В. представляется вполне актуальной и интересной как в научном, так и в практическом отношении.

Первая глава содержит обзор литературы по теме диссертационной работы. Отмечен важный итог исследований научной группы И. В. Подмошенского - создание на основе эрозионного разряда импульсного эталонного излучателя с яркостной температурой 40000 К. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований параметров плазмы эрозионных разрядов, выполненных в последние 30 лет. Сделан важный вывод об отсутствии к моменту выполнения настоящей работы комплексных и непротиворечивых данных об основных параметрах плазмы импульсных эрозионных разрядов.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной техники и методам измерений. Описана экспериментальная установка, содержащая в своем составе импульсный источник эрозионной плазмы, истекающей в воздушную среду атмосферного давления, и комплекс средств измерения для регистрации структуры плазменной струи и спектров ее излучения. Создана система автоматизированного сбора экспериментальных данных, обеспечивающая одновременную синхронизованную регистрацию изображения струи с частотой кадров до 20 кГц, регистрацию обзорного спектра излучения струи с помощью многоканального оптоволоконного спектрометра AvaSpec-UL2048 в диапазоне длин волн 250÷800 нм (длительность экспозиции – 2 мс) и двух систем анализа матричных пространственно разрешаемых спектров, состоящих из дифракционного спектрометра MS-257 и быстродействующей регистрирующей камеры на его выходе.

Выполнена расшифровка спектров излучения плазменных струй при дозвуковом (энерговклад $2-5 \text{ МВт/см}^3$) и сверхзвуковом ($20-30 \text{ МВт/см}^3$) режимах истечения. Коренным отличием спектров сверхзвуковой струи является наличие в нем спектральных линий однократно ионизованных атомов меди Cu II , углерода C II и кислорода O II . Присутствие линий с энергией возбуждения около 20 эВ и выше, которые наблюдаются вплоть до расстояний $15-30 \text{ мм}$ от среза капилляра, свидетельствуют о том, что температура электронов T_e там не менее 2 эВ . Автор демонстрирует хороший уровень проведения эксперимента и понимание физических принципов, лежащих в основе используемых методик обработки результатов измерений.

В третьей главе обосновывается выбор методов спектральной диагностики эрозивной плазмы. Результаты оценок состояния плазмы, выполненных в первом разделе главы, приводят к выводу о том, что в приосевой области струи плазма квазистационарна и близка к состоянию ионизационного равновесия, однако вследствие пространственной неоднородности необходим индивидуальный выбор методов спектральной диагностики для разных областей исследуемого объекта. Задача перехода к локальным коэффициентам эмиссии излучающих плазменных компонент решается процедурой, основанной на использовании методов компьютерной томографии плазмы. Выбранный метод измерения концентрации электронов n_e основан на использовании линейного эффекта Штарка применительно к наблюдаемым бальмеровским линиям H_α и H_β . Метод реализован в виде программного комплекса автоматической обработки массива регистрируемых данных, позволяющего анализировать пространственно-временные распределения n_e .

Избранный в работе метод определения температуры электронов основан на анализе относительных заселенностей возбужденных состояний атомов и ионов в максимально широком диапазоне энергий их возбуждения. Особенно эффективным он оказался применительно к иону C II при сверхзвуковом режиме истечения, в условиях выполнения частичного локального термодинамического равновесия в диапазоне энергий возбуждения от $16,3$ до $22,5 \text{ эВ}$.

Выполненное в следующем разделе главы моделирование электронно-колебательно-вращательного спектра излучения молекулы AlO (электронный переход $V^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$) позволяет проводить оценку колебательной T_v и вращательной T_r температур молекул периферийной зоны плазменной струи и сопоставлять с результатами определения этих параметров по спектрам молекул C_2 (полосы $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$ перехода) и CN (полосы $V^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ перехода).

Четвертая глава содержит результаты спектральных измерений в обоих режимах истечения. В ближней зоне дозвуковой плазменной струи ($P = 1$ атм) измерено пространственное распределение концентрации электронов, величина которой в выходном сечении капилляра составляет $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и в условиях ионизационного равновесия соответствует температуре электронов 14000 К.

Основные измерения параметров плазмы выполнены на начальном участке струи при сверхзвуковом ее истечении. Высокоскоростная видеосъемка и полученные продольные и поперечные распределения параметров плазмы указывают на то, что в этой области формируется устойчивая ударно-волновая структура течения, включающая в себя зону свободного расширения, «висячий» скачок и прямой скачок уплотнения (диск Маха). Измеренные пространственно-временные изменения параметров (температуры и концентрации электронов) сильно ионизированной плазмы с переменным давлением находятся в целом в качественном согласии с данными о характере изменения параметров вдоль оси недорасширенной струи неравновесной плазмы при истечении в пространство, затопленное нейтральным холодным газом, представленными в монографии Г.А.Лукиянова «Сверхзвуковые струи плазмы».

В **Заключении** достаточно четко сформулированы основные научные результаты диссертационной работы.

Отметим, что в целом, автор демонстрирует хороший уровень проведения эксперимента и понимание физических принципов, лежащих в основе используемых методик обработки результатов измерений. Тем не менее работа не лишена некоторых недостатков, которые перечислены ниже:

1. Во **Введении** в разделе Актуальность, где обсуждаются возможные приложения мощных импульсных разрядов, автор сразу же переходит к применению для этих целей импульсного капиллярного разряда. С нашей точки зрения, для этого в **Главе 1**, посвященной обзору литературы, следовало бы обосновать такой выбор и сопоставить разные типы мощных импульсных разрядов. В частности, например, если говорить о возможных приложениях разрядных систем, то сразу встает вопрос о ресурсе системы. И здесь в качестве альтернативы источнику И. В. Подмошенского можно предложить поверхностный сильноточный разряд на ферритах с яркостной температурой, близкой к источнику И. В. Подмошенского, но с ресурсом $\sim 10^5$ вспышек (см. напр. S.N.Tskhai, D.A.Akimov, S.V.Mit'ko, V.N.Ochkin, A.Yu.Serdyuchenko, D.A.Sidorov-Biryukov, D.V.Sinyaev, A.M.Zheltikov, *Time-resolved polarization-sensitive measurements of the electric field in a sliding discharge by means of DC field-induced coherent scattering*, J. of Raman Spectroscopy, 2001, v.32, p.p.177-181.).

2. В качестве научного положения, выносимого на защиту (их всего шесть), следующий пункт:

- Программный комплекс, включающий в себя процедуры идентификации спектральных линий, локализации экспериментальных данных с использованием средств компьютерной томографии, определения концентрации и температуры электронов n_e и T_e на основе совокупных данных о наблюдаемых спектральных компонентах, оценки T_v , T_r на основе моделирования спектра излучения двухатомной молекулы AlO (переход $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$), -

не является положением, т.е. положительным утверждением.

Приведенные в отзыве замечания носят частный характер и не снижают общего высокого уровня диссертации в целом. Полученные в работе результаты являются новыми, научно обоснованными, и их достоверность не вызывает

сомнений. Основные результаты работы опубликованы в научных журналах, докладывались на конференциях и получили высокую оценку специалистов.

Результаты работы могут быть использованы при проведении научных исследований в ФИАН, ИОФАН, ИНХС, МГУ и др. научных организациях. Практические выводы работы могут быть востребованы научно-исследовательскими институтами, инновационными малыми предприятиями, российскими и зарубежными фирмами, работающими в секторе высоких технологий.

Автореферат адекватно отражает содержание и результаты диссертации.

Доклад по материалам диссертации, представленный автором, заслушан на семинаре отдела Оптики низкотемпературной плазмы ФИАН и получил единогласное одобрение Ученого Совета отдела.

Диссертационная работа Ефимова А. В. «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ» представляет собой законченное научно-квалификационное исследование, по своей тематике соответствует заявленной специальности, удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, установленным в п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Ефимов А.В. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составлен главным научным сотрудником, руководителем семинара отдела Оптики низкотемпературной плазмы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) д.ф.-м.н. Очкиным Владимиром Николаевичем.

Г. н. с. отдела Оптики низкотемпературной
плазмы ФИАН, руководитель семинара отдела
д.ф.-м.н., профессор



В. Н. Очкин

119991, г. Москва, Ленинский проспект д. 53
Телефон: +7(499) 132-65-21
E-mail: ochkin@sci.lebedev.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)
19991 Москва, Ленинский проспект д. 53
Телефон: +7(499) 132-69-78.
E-mail: scilpi@mail.ru

«15» сентября 2017 г.

Ученый секретарь ФИАН, к.ф.-м.н.
119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53
Телефон: +7(499) 132-69-78,
E-mail: kolobov@lpi.ru



А. В. Колобов