

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Ефимова Александра Валерьевича на тему: «РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ» представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

В настоящее время низкотемпературная плазма газовых разрядов находит применение для решения многочисленных задач, связанных с получением новых материалов, газовыми лазерами, плазменной аэродинамикой и др. Эффективное ее использование требует знания параметров плазмы. Несмотря на очевидные успехи в моделировании различных разрядов, основными источниками получения информации о параметрах плазмы остаются экспериментальные методы, в первом ряду которых находятся невозмущающие спектрально-оптические методы. Они развиваются уже в течение многих десятилетий, и, казалось бы, проблем с их применением не должно остаться. Но решение каждой практической задачи требует разработки новых способов получения плазмы, которая далеко не соответствует каноническим условиям применения спектральных методов диагностики. Следовательно, стоит актуальная задача адаптации методов диагностики применительно к условиям измерений, которая зачастую связана с созданием новых подходов.

Автор поставил задачу развить комплекс спектральных и визуальных методов диагностики нестационарной пространственно-неоднородной плазмы сложного компонентного состава импульсного капиллярного разряда с аблирующей стенкой. Разряд имеет ряд важных применений и является крайне сложным объектом для исследования.

Тема диссертационной работы, безусловно, является актуальной.

Структура и содержание работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (118 наименований) и приложения. Объем диссертации составляет 144 страниц, включая 82 рисунка.

Во Введении сформулированы общие положения диссертации, такие, как актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, цели исследования, задачи исследования, апробация работы, опубликованные работы, положения, выносимые на защиту, вклад автора в выполненные исследования. Автор принимал участие в постановке, подготовке, проведении экспериментальных исследований, анализе и обсуждении полученных результатов.

Первая глава содержит достаточно подробное описание известных результатов по физике капиллярных разрядов, данных по эрозионным разрядам, плазменным волноводам, эрозионному разряду в тефлоновом капилляре.

Литературный обзор производит хорошее впечатление подробным анализом результатов, полученных в условиях, сходных с предполагаемыми для исследования. Ясны не решенные до начала работы проблемы.

Глава 2 содержит описание экспериментальной установки и средств диагностики. В работе используется капиллярный разрядник с капилляром, изготовленным из полиметилметакрилата. Материал капилляра определяет состав плазмы. Начальный диаметр капилляра 1 мм, длина канала 4 мм. Разрядный импульс формируется источником на основе стандартной схемы емкостного накопителя. Распыляемый материал электрода служил для диагностики разряда. Из-за абляции канала продолжительность его жизни 5-7 выстрелов. Дозвуковой или сверхзвуковой режим истечения плазмы из капилляра определяется значением мощности разрядного импульса.

Экспериментальный стенд снабжен оборудованием для визуализации разряда и спектральных измерений с пространственным 25 мкм и временным разрешением до 10 пс, спектральным разрешением 0.2 нм. Для сбора данных была разработана автоматизированная система сбора данных, синхронизированная с разрядным импульсом. Подробно описана схема оптических измерений, ее юстировка и калибровка. В качестве устройства, записывающего спектр, использовались различные видеокамеры. Дана сравнительная характеристика видеокамер. Важно, что хотя анализируется излучение вдоль луча зрения, учитывается, что излучающие частицы могут находиться в разных частях разряда, и получено изменение излучающих компонент в пространстве. Проанализирован состав спектров излучения эрозионной плазмы – он состоит из компонент материала капилляра и атомов (и ионов, в энергонапряженном режиме), вызванных эрозией электродов. Интересным является то, что в сверхзвуковом режиме большую долю излучения составляет континуум и отсутствует излучение водорода бальмеровской серии.

Содержание главы ясно показывает, с какими трудностями пришлось столкнуться автору для получения надежной информации о разряде.

Третья глава посвящена определению параметров разряда по результатам спектральных измерений. Для реализации этого необходимо использовать те, или иные модели. Автор рассматривает известные модели и возможности их использования: модель полного термодинамического равновесия, локального термодинамического равновесия, частичного ЛТР.

Рассмотрено состояние плазмы в приосевой области разряда. Проанализирован отрыв температуры электронов от температуры тяжелых частиц. Сделан вывод о том, что заселенность возбужденных состояний атомов водорода не следует бальмановской зависимости с температурой электронов и причиной этого является амбиполярная диффузия заряженных частиц. Но уравнение Саха выполняется и по нему можно определять температуру электронов при определении концентрации электронов по полуширине линий водорода серии Бальмера и континуума.

Автор совершенно справедливо отмечает, что измерение усредненных по пространству характеристик неоднородного разряда совершенно не описывает плазменный объект. Это важно, поскольку часто об этом забывается. Для решения проблем с пространственной неоднородностью автор использует компьютерную томографию. Из-за интенсивной эрозии канала многоаксиальную томографию применить невозможно и автор использовал одноаксиальную томографию в приближении осевой

симметрии. Подробно описан алгоритм операций. Описана методика определения концентрации и температуры электронов и погрешности измеряемых величин. В частности, предполагается использовать большой набор линий излучения атомов. Представлены группы линий, использованных для диагностики разряда. Методика называется автором программой «комплексного анализа спектральных данных».

Анализ результатов показал, что не удалось найти универсальную комбинацию спектральных компонент, которая позволяла бы с приемлемой точностью (10-15%) фиксировать температуру методами эмиссионной спектроскопии во всём исследуемом диапазоне параметров объекта в рамках имеющегося технического оборудования. Этот недостаток компенсировался детальным совместным анализом результатов множества различных вариантов температурных оценок, выполненных в пределах их физической применимости.

Отдельно рассмотрена диагностика холодных зон разряда, в которых наблюдается излучение молекулярных компонент. Описано моделирование неразрешенных вращательно-колебательных молекулярных спектров двухатомных молекул разных секвенций, с помощью которых определялась вращательная и колебательная температуры. Для молекул CN и C₂ использовались коммерческие программы, а для молекул AlO – собственная программа. Проведены оценки относительных концентраций тяжелых частиц в основном состоянии в предположении заселения излучающих состояний электронным ударом. Проведен расчет равновесного состава струи.

Четвертая глава содержит результаты измерений.

Сначала рассмотрен дозвуковой режим. Приведены пространственно-временная картина концентрации электронов в струе, определенная по линии излучения водорода H_β (максимальное значение $n_e \sim 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). В капилляре концентрация электронов $n_e \sim 1.2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Определенная по излучению меди температура $T_e = 0.9 \div 0.6 \text{ эВ}$ характеризует периферийную область разряда, в которой интенсивность излучения максимальна. Определенная по концентрации электронов в приближении равновесия температура электронов не превышает 1.5 эВ. Поперечное распределение параметров неоднородное, причем, если интенсивность водородных линий падает к периферии, то интенсивность молекулярных полос растет к периферии. Температура электронов падает к периферии, концентрация электронов имеет провал на оси.

При больших энерговкладах плазменная струя истекает со сверхзвуковой скоростью и создает специфическую ударно-волновую структуру. Получены пространственные распределения интенсивностей излучения линий и полос, пространственно-временное распределение концентрации электронов с провалом в области разрежения. Температура электронов падает в области разрежения (1.8 эВ) и растет в области диска Маха (2.5 эВ), затем вновь падает (1.6 эВ). Заметим, что характерные величины концентрации электронов и температуры согласуются с данными для равновесной дуги.

Получены радиальные распределения параметров струи. На основе сравнения температур электронов, колебательной и вращательной температуры C₂ сделан вывод о

том, что в периферийной области эрозионного разряда, особенно в области разрежения, приближение однотемпературной ЛТР-плазмы не выполняется.

Последний параграф суммирует полученные результаты, перечислены особенности эрозионного разряда, которые нужно учитывать при его исследовании и интерпретации результатов измерений.

Диссертация не свободна от недостатков.

Замечания.

1. Автор пишет (с. 67): «В исследуемом разряде наиболее вероятной зоной, в которой плазма может быть близка к состоянию ТР, является канал капиллярного разряда, стенки которого обеспечивают определённую степень изоляции». На самом деле это не так, поскольку стенка расплывается и не может считаться «теплоизоляционной».
2. С. 69. «Несмотря на незначительную разницу температур в керне струи закон Больцмана для распределения атомов Н по возбужденным состояниям не выполняется.» Желательно было бы показать распределение, тем более, что дальше следует вывод о невозможности определения температуры электронов по заселенностям состояний.
3. Автор говорит об отсутствии Больцмановского закона заселенностей возбужденных состояний атома водорода, с другой стороны для определения температуры предлагается использовать относительные интенсивности излучения разных атомов (с. 88), а также использовать ЛТР подход. Вероятно какая-то нечеткость в изложении.
4. Автор пишет об аксиальной симметрии разряда и в этом предположении делаются расчеты пространственных распределения излучающих состояний (однолучевая томография). Очевидно, что в струе система не имеет такой симметрии из-за расположения электрода. Не понятно, как автор обходит эту ситуацию (какие-то слова в тексте есть, но очень не определенные).
5. С.109. «Выполненные оценки позволяют нам в последующем анализе считать плазму ядра состоящей преимущественно из водорода атмосферного давления.» Но оценки делались для периферийной области, поскольку именно там излучают молекулы.
6. С.122. «в распределении концентрации электронов появляется минимум на оси, вызванный превышением в центральной области значения электронной температуры над значениями «нормальных» температур этих компонент». Это не понятно: радиальное распределение концентраций электронов определяется уравнением баланса для электронов. В нем нет «нормальной температуры». Если есть провал, значит есть сток. Куда?
7. Общие замечания: (1) Глава 3 составлена крайне неудачно: в ней используются результаты, которые будут приведены только в Главе 4. Это значительно затрудняет анализ работы. (2) Много терминологической путаницы. Автор пишет «В качестве «нулевого» приближения состава плазменной струи...». Далее уже пишется о «... ядре разряда...». Но разрядом ранее называлась область в капилляре. (3) В диссертации очень много опечаток. В ряде случаев недостатки изложения приводят к затруднению понимания текста, чем, возможно и обусловлено большинство замечаний. На стр.100 без объяснения появляется термин «нормальная температура»

и с помощью этой величины объясняются полученные результаты. Объяснение появляется только на стр.114. На стр.100 без объяснения появляется термин «нормальная температура» и с помощью этой величины объясняются полученные результаты. Объяснение появляется только на стр.114.

Отмеченные замечания не снижают достоверности и важности полученных в диссертации результатов.

Результаты диссертационной работы представляют большую практическую ценность. Они могут быть использованы при разработке технологических процессов, а также в фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики низкотемпературной плазмы. Нужно отметить, что важны не только результаты, но и разработанные подходы к диагностике, которые могут быть использованы для исследования многих неоднородных нестационарных разрядов.

Новизна представленных в диссертации результатов не вызывает сомнений.

Можно отметить некоторые, наиболее важные научные результаты:

1. Разработанные методы и результаты получения пространственно-временных профилей излучательных характеристик основных плазменных компонент в протяженных нестационарных плазменных струях, формируемых разрядом в капилляре из полиметилметакрилата.
2. Разработанный программный комплекс для определения параметров плазмы, включающий в себя процедуры идентификации спектральных линий, локализации экспериментальных данных с использованием средств компьютерной томографии.
3. Пространственные распределения n_e , T_e плазмы приосевой области струи, формируемой разрядом в капилляре из полиметилметакрилата в широком диапазоне удельных энергетических плотностей, отличающихся пространственной неоднородностью и различными характеристиками течения.

Результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и представлены в 9 печатных работах (в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК РФ).

Результаты диссертационной работы могут использоваться в исследовательских, проектных и конструкторских организациях, работающих в области исследования и применения низкотемпературной плазмы (ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ИИХС РАН, МГУ, МГТУ, К(Г)ФУ, КНИГУ, ИГХТУ и др.).

В целом диссертация Ефимова А.В. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная задача физики и химии неравновесной плазмы: развита комплекс спектральных и визуальных методов диагностики нестационарной пространственно-неоднородной плазмы сложного компонентного состава, который реализован в экспериментальных исследованиях свойств и параметров импульсного капиллярного разряда. Задачи и содержание работы отвечают профилю специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Диссертационная работа Ефимова А.В. отвечает критериям пункта 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы.

Зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии
импульсных процессов" ИНХС РАН,
доктор физико-математических наук

Ю. А. Лебедев

Сведения о составителе отзыва:

Лебедев Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, почтовый адрес: 117597, Москва, Литовский бульвар, д.1., кв. 490, тел.: 8(495)4270926, адрес электронной почты: lebedev@ips.ac.ru, наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН), должность: заведующий лабораторией.

Подпись д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедева удостоверяю
Ученый секретарь ИНХС РАН
кандидат химических наук

И.С. Калашникова

Адрес организации: 119991, Москва, Ленинский проспект, 29, тел. 8(495) 9544275, e-mail: tips@ips.ac.ru