

« УТВЕРЖДАЮ »

Директор Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института общей физики им. А. М.
Прохорова Российской академии наук, академик РАН
Щербаков И. А.



2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Кавыршина Дмитрия Игоревича «Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

В своей диссертационной работе Кавыршин Д. И. провел подробное экспериментальное исследование электродуговой плазмы гелия атмосферного давления. Исследованы режимы горения разряда при подводе мощности от источника постоянного тока (сила тока дуги варьировалась от 100 до 400 А, радиус токового канала составлял ~ 1 мм) и при наложении импульса тока, подогревающего электронную компоненту плазмы. При исследовании данного плазменного объекта методами эмиссионной спектроскопии были собраны данные об абсолютных интенсивностях и контурах спектральных линий, позволившие при помощи классических подходов определить радиальное распределение концентрации электронов, значение температуры тяжелых частиц на оси разряда и концентрации возбужденных состояний атомов гелия, излучающих в УВИ диапазоне. Однако задача определения температуры электронов на основе спектроскопических данных применительно к плазме гелия оказывается нетривиальной.

Собранные в работе данные иллюстрируют тот факт, что плазма гелия атмосферного давления является неравновесной (не подчиняющейся закону Больцмана и уравнениям Саха с электронной температурой). Причинами отклонения гелиевой плазмы от состояния равновесия называются самые высокие пороги возбуждения и ионизации атома HeI и иона HeII, а также высокие значения коэффициентов теплопроводности λ и диффузии D_e плазмы гелия. Диссертационная работа Кавыршина Д. И. направлена на углубление понимания процессов, выводящих плазму гелия из состояния ионизационного равновесия. Определение ионизационного состояния генерируемой плазмы, и прежде всего ее важнейшего параметра - электронной температуры, является одной из важнейших задач при исследовании плазменных систем, что делает работу Кавыршина Д. И. **актуальной**.

Целью работы явилось получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления. Для ее достижения автором были сформулированы и выполнены следующие задачи:

1) Создание диагностического комплекса, включающего в себя генератор сильно ионизированной стационарной и квазистационарной плазмы гелия, и средства электрических и оптических измерений;

2) Получение экспериментальных данных об абсолютных интенсивностях излучения спектральных линий разной кратности ионизации и непрерывного излучения плазмы;

3) Разработка и обоснование методик определения на основе собранных данных основных параметров плазмы: концентрации электронов n_e , температуры электронов T_e , температуры тяжелых частиц T_g .

4) Анализ термодинамического состояния исследуемой электродуговой плазмы и установление характеристик неравновесности.

Диссертация состоит из введения, трех глав и выводов. Полный объем диссертации 143 страницы текста с 63 рисунками и 6 таблицами. Список литературы содержит 83 наименования.

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цели и задачи работы, обозначены основные трудности, которые предстоит преодолеть на пути их выполнения. Также в этой части работы приводится обзор имеющихся на сегодняшний день основных публикаций, посвященных изучению плазменных объектов, аналогичных рассматриваемому в представленной работе.

Во второй главе описывается столкновительно - излучательная модель, которую автор предполагал использовать для анализа состояния неравновесной плазмы гелия. Приводится набор процессов, учитываемых автором в модели, и проводится обзор литературных данных об экспериментальных и аналитических сечениях данных процессов. Также глава содержит численные оценки скоростей амбиполярной диффузии и трехчастичной рекомбинации, выполненные с использованием аналитических сечений процессов, указывающие на то, что диффузионные потери будут основным механизмом гибели заряженных частиц.

Третья глава посвящена разработке экспериментального стенда для исследования гелиевой плазмы атмосферного давления. Стенд включает в себя специально разработанный и созданный плазмотрон и средства оптических и электрических измерений, а также источник постоянного и импульсного тока, служащие для поддержания стационарного горения дуги и ее подогрева до более высоких температур соответственно. Большое внимание в этой главе уделено абсолютной калибровке измерительных средств и определению их аппаратных функций. В результате этой работы автором были получены кривые обратной спектральной чувствительности для всех использовавшихся в эксперименте спектрометров, позволившие определить абсолютные значения заселенностей возбужденных состояний атомов и ионов гелия.

В четвертой главе приводятся и анализируются собранные экспериментальные данные об излучательной способности плазмы гелия атмосферного давления. Основное внимание при этом было уделено интенсивностям и контурам спектральных линий, на их основе были определены концентрации электронов и излучающих состояний атомов и ионов гелия, температуры тяжелых частиц и электронов. Благодаря внимательно проведенной процедуре абсолютной калибровки спектрометров автору удалось получить распределение атомов гелия по возбужденным состояниям в более широком, чем в прежних исследованиях, диапазоне энергий возбуждения $20.9 \div 24.2$ эВ. При этом автор наблюдал существенное занижение концентраций атомов в состояниях с $n > 5$ и завышение концентрации атомов в основном состоянии.

В выводах автор приводит основные полученные в работе результаты и формулирует ряд тезисов относительно причин и характера отклонения плазмы гелия атмосферного давления от равновесного состояния. Также автор предлагает способы снизить влияние неравновесности распределения атомов гелия по возбужденным состояниям на результат определения температуры электронов.

Научная новизна полученных результатов

В работе была создана установка, позволяющая получить сильноионизованную (со степенью ионизации более 50%) плазму гелия атмосферного давления, изучен характер неравновесности данной плазмы и отработаны методики определения ее основных параметров.

Были получены количественные данные о заселенности возбужденных состояний He I в прежде не исследованном широком диапазоне энергий возбуждения $20.9 \div 24.2$ эВ.

Выявлены особенности метода определения температуры электронов T_e в гелиевой плазме по отношению интенсивностей атомарных и ионных спектральных линий, позволившие дать рекомендации по выбору наилучших пар линий излучения He I и He II, отношение интенсивностей которых наименее чувствительно к неравновесности заселения их излучающих уровней.

Выполнено независимое измерение важнейшего параметра неравновесной плазмы - температуры тяжелых частиц, с использованием смешанного контура редко исследуемой инфракрасной линии He I 1083 нм.

Благодаря абсолютной калибровке интенсивностей излучения и высокому спектральному разрешению в ходе работы были проверены и уточнены литературные данные о константах Штарк-эффекта и вероятностях спонтанных переходов большой группы линий He I, используемых при анализе заселенностей возбужденных состояний и независимом определении концентрации электронов n_e в плазме.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что полученные новые количественные данные по неравновесной заселенности возбужденных состояний He I в широком

диапазоне энергий $20.9 \div 24.2$ эВ (при потенциале ионизации $I = 24.59$ эВ) в условиях сильной ионизации ($n_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$) могут послужить дальнейшему развитию теоретических моделей описания кинетики заселения-расселения возбужденных состояний атомов пространственно неоднородной сильно ионизованной плазмы. **Результаты диссертационной работы могут быть использованы** в ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, ТРИНИТИ, ФИАН, МИФИ, ИНХМ РАН, МФТИ, МГТУ и др.

Основные положения, выносимые на защиту, отражают наиболее значительные результаты работы, такие, как:

- создание установки, позволившей получить и исследовать сильно ионизованную квазистационарную плазму гелия атмосферного давления, включающей в себя систему наложения импульса тока на стационарно горящую дугу;

- вывод о сильной ионизационной неравновесности полученной плазмы, выразившейся в возрастающей с ростом энергии возбуждения E_k крутизне спада заселенности высоковозбужденных состояний HeI и их значительной недонаселенности, при том, что концентрация электронов в плазме n_e оказалась лишь незначительно, на 10 - 20%, ниже ее равновесных значений.

Экспериментальные данные получены автором при помощи современных измерительных средств, обеспечивающих высокое пространственно-временное и спектральное разрешение. Достоверность результатов анализа обеспечивается тем, что использована совокупность независимых спектроскопических методик и модельных описаний, а также выполнен критический анализ границ их применимости. Представленные в работе результаты были получены автором лично или при его определяющем участии. Автор внес существенный вклад в постановку целей и задач научного исследования, разработку и создание экспериментального комплекса для получения и исследования сильно ионизованной плазмы гелия атмосферного давления.

Вместе с тем, имеются некоторые недостатки представленной работы:

1. Столкновительно-радиационная модель гелиевой плазмы, представленная в главе 1, по-видимому, будет иметь некоторые сложности с описанием экспериментально исследованной в работе сильно неоднородной плазмы.

2. Плазма гелия, как элемента с самым высоким потенциалом ионизации, должна быть очень чувствительна к присутствию в ней даже незначительных примесей. Однако в диссертации вопрос о влиянии возможных примесей на состояние плазмы практически не затрагивается.

3. Не рассмотрена, а лишь упомянута, возможность определения электронной температуры по абсолютным и относительным интенсивностям непрерывного излучения плазмы гелия.

Указанные замечания не затрагивают основного научного содержания работы и не снижают общей высокой оценки диссертации Д. И. Кавырина. Основные поставленные задачи

исследования выполнены. Материал диссертации изложен четко и хорошо проиллюстрирован. Автореферат диссертации адекватно передает основное содержание работы. Рецензируемая диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, она содержит новую информацию об особенностях неравновесной сильноионизованной плазмы гелия и является законченным научно-квалификационным исследованием.

Диссертационная работа Кавырина Дмитрия Игоревича на тему «Получение и исследование сильноионизованной квазистационарной плазмы гелия атмосферного давления» соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатской диссертации, установленным в п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней № 842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Кавырин Д.И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составлен заведующим лабораторией «Газодинамические явления в СВЧ разряде» Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.04.08 – физика плазмы Коссым И.А.

Доклад Кавырина Д.И., отражающий основные результаты диссертации, был заслушан на научном семинаре лаборатории «Газодинамические явления в СВЧ разрядах» отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН № 367 от 25 января 2017 г. Работа получила единогласную положительную оценку участников семинара.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета отдела физики плазмы, протокол № 437 от 14 сентября 2017 г.

Заведующий лабораторией
газодинамических явлений в СВЧ-разряде, д.ф.-м.н.

И.А. Коссым

тел. 8 499 135 41 65, e-mail: kossyi@fpl.gpi.ru

Зам. председателя Ученого совета
отдела физики плазмы, д.ф.-м.н.

С.В. Щепетов

тел. 8 499 503 83 37, e-mail: shch@fpl.gpi.ru

Подписи подтверждаю
Ученый секретарь ИОФ РАН д.ф.-м.н.

С. Н. Андреев