

ОТЗЫВ

официального оппонента 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.

Диссертационная работа Кавыршина Д. И. посвящена изучению электродуговой гелиевой плазмы атмосферного давления при ее стационарном и квазистационарном нагреве с удельным энерговкладом $50 \div 500 \text{ кВт/см}^3$. Исследована как дуга постоянного тока (200 – 400 А), так и режим импульсного питания разряда, в котором в стационарно горящую дугу вкладывается энергия, запасенная в батарее конденсаторов. Необходимость наложения импульса мотивирована тем, что для достижения более высоких температур плазмы гелия требуются большие энерговклады, технически невозможные в режиме стационарного нагрева. В связи с высокими коэффициентами переноса и особенностями энергетического спектра плазма гелия атмосферного давления проявляет неравновесные свойства, резко отличающие ее от большинства сильноионизованных плазменных состояний, для которых в схожих условиях неравновесность не проявляется. Все это делает гелиевую плазму сложным для исследования объектом ввиду неприменимости равновесных подходов для ее описания. Выполненный автором предварительный анализ экспериментальных работ показал, что характер распределения атомов гелия по возбужденным состояниям не подчиняется существующим моделям неравновесных состояний. Знание ионизационного состояния генерируемой плазмы, и прежде всего ее важнейшего параметра – электронной температуры, является фундаментальной задачей плазменной диагностики. Поэтому вопросы о природе и механизмах неравновесности сильноионизованной плазмы гелия, решаемые в диссертационной работе Кавыршина Д.И., являются **актуальными**. Основное внимание в диссертации уделено излучательным свойствам электродуговой плазмы гелия атмосферного давления в широком диапазоне длин волн $200 \div 1100 \text{ нм}$. В результате проведенной работы были получены количественные данные о заселенностях возбужденных состояний HeI в более широком, чем в прежних исследованиях, диапазоне энергий возбуждения $20.9 \div 24.2 \text{ эВ}$, экспериментальное распределение которых оказалось резко отличающимся от равновесного, описываемого законом Больцмана с электронной температурой. Экспериментальные данные были получены при помощи современных измерительных средств; излучательные характеристики выполнены с тщательностью и характеризуются высоким пространственно-временным и спектральным разрешением. Полученные в ходе работы результаты найдут применение в диагностике неравновесной плазмы гелия и послужат дальнейшему развитию теоретических моделей описания кинетики заселения-расселения энергетических уровней атомов сильноионизованной гелиевой плазмы.

Диссертация состоит из введения, трех глав и выводов. Полный объем диссертации 143 страницы текста, включая 63 рисунка и 6 таблиц. 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 рассматриваются конструкционные особенности диагностического плазмотрона, специально разработанного и созданного для проведения данной работы, а также используемых систем питания и измерений. Автор, используя литературные источники, выбрал оптимальную геометрию канала для обеспечения устойчивого горения дуги и сконструировал разрядную камеру, позволяющую эффективно охлаждать ее и проводить оптические измерения. В качестве источника импульсного питания была использована батарея конденсаторов, соединенная параллельно с источником стационарного питания. Электрическая схема включала в себя набор элементов, обеспечивающих защиту источника стационарного питания и длительность импульса тока ~ 1 мс, вытекающую из требования квазистационарности процесса импульсного «подогрева» плазмы.

В третьей главе рассматриваются зарегистрированные в ходе экспериментов спектральные данные, и на их основе проводится определение концентраций электронов и возбужденных состояний атомов, температуры тяжелых частиц и температуры электронов. Автор уделяет большое внимание калибровке спектрометров, в результате чего оказывается решена задача определения абсолютных интенсивностей регистрируемых в эксперименте спектральных линий в широком диапазоне энергий возбуждения. Важнейшим результатом работы оказываются полученные распределения атомов гелия по возбужденным состояниям, демонстрирующие эффект нереализации высоковозбужденных состояний. Также автором были определены ключевые параметры плазмы, такие, как температура электронов и тяжелых частиц, а также концентрация электронов. Значительным достижением является измерение температуры тяжелых частиц по доплеровской составляющей редко исследуемой линии HeI 1083 нм.

В выводах автор формулирует основные результаты проведенной работы, уделяя особое внимание вопросу о природе и характеристиках неравновесности исследованной плазмы, а также приводит рекомендации по методам определения параметров подобных плазменных объектов, прежде всего электронной температуры плазмы.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- 1) Спроектирован и создан экспериментальный стенд для получения и исследования сильноионизированной (со степенью ионизации более 50%) стационарной плазмы гелия атмосферного давления с температурой электронов около 30 000 К при стационарном нагреве и до 40 000 К при импульсном квазистационарном подогреве плазмы.
- 2) Впервые получено экспериментальное распределение абсолютных заселенностей атомов гелия по возбужденным состояниям в широком диапазоне энергий возбуждения 20,9 ÷ 24,2 эВ. Установлено, что заселенности

высоковозбужденных состояний HeI с энергией связи, много меньшей реализованной в эксперименте температуры электронов, существенно ниже своих равновесных значений.

- 3) Предложены подходы к интерпретации экспериментально наблюдаемого явления неравновесности, его описанию и определению температуры электронов на основе регистрируемых спектроскопических данных.

Достоверность и обоснованность представленных в работе результатов обеспечивается одновременным использованием нескольких автоматизированных методов спектральной диагностики плазмы, ее модельных описаний и критического анализа границ их применимости, и не вызывает сомнений. Результаты, представленные в диссертации Кавыршина Д.И., изложены в шести печатных работах, в том числе в статьях в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ, а также журналах из базы данных отслеживания цитируемости WoS. Основные результаты работы были представлены на восьми Международных конференциях.

По представленной работе следует сделать следующие замечания:

- 1) В работе не выделен раздел «обзор литературы», цитируемые экспериментальные работы других авторов и теоретические подходы к их описанию приводятся в главе «Введение».
- 2) В работе лишь вскользь говорится об интересном наблюдаемом в работе эффекте – полном «растворении» высоколежащих атомных состояний HeI с главным квантовым числом $n \geq 7$. И совсем не упоминается о возможном «растворении» высоколежащих энергетических уровней иона HeII.
- 3) В работе не анализируется влияние отклонения от осесимметричности плазменного объекта на точность процедуры абелизации при обработке хордовых измерений спектров.
- 4) При обсуждении неравновесности исследуемой плазмы гелия по сравнению с плазмой аргона и азота в условиях, идентичных рассматриваемым в работе, приведен вид заселенностей возбужденных состояний ионов ArII и NII, свидетельствующий о справедливости больцмановского распределения. Но не рассматриваются возбужденные состояния атомов ArI и NI, для которых в гелии автором экспериментально получены существенные отклонения от равновесия (Рис. 55-56, стр. 114-115).
- 5) Роль параметра неравновесности, введенного в выражении для отношения интенсивностей спектральных линий разной кратности ионизации (формула (75), стр. 119) следовало бы пояснить. Не указано, как соотносится утверждение о слабом влиянии на вычисленную электронную температуру варьирования параметра на 2 порядка с динамическим диапазоном спектрографов и экспериментально измеренными соотношениями интенсивностей линий, например, приведенными на Рис. 59-60, стр. 123-124.
- 6) Принятая структура работы в целом несколько усложняет ее восприятие: в тексте присутствуют отсылки «об этом далее» и «см. пункт №».
- 7) В тексте диссертации встречаются опечатки.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертации Д. И. Кавыршина. Все поставленные цели исследования были достигнуты и сформулированные задачи выполнены. Материал диссертации изложен хорошим литературным языком, графический материал выполнен качественно. В автореферате диссертации достаточно полно и точно передано основное содержание работы. В целом представленная работа выполнена на высоком научном уровне, она содержит новую информацию об особенностях неравновесной сильноионизованной плазмы гелия и является законченным научно-квалификационным исследованием на актуальную тему.

Диссертационная работа Кавыршина Д. И. 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 Кавыршин Д. И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник лаборатории проблем новых ускорителей Отделения ядерной физики и астрофизики, ФГБУН Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, к.ф.-м.н. Огинов Александр Владимирович, 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53. Т. 8-499-132-64-68, e-mail: oginov@lebedev.ru



Огинов А. В.

Подпись Огинова А.В. заверяю

Ученый секретарь,
к.ф.-м.н.



Колобов А.В.