

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Каланова Дмитрия Валерьевича «Радиационные эффекты в неравновесной плазме дуговых и тлеющих разрядов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Каланова Д.В. посвящена вопросам теоретического и экспериментального характера, связанных с процессами пленения резонансного и реабсорбции видимого излучения в низкотемпературной неравновесной плазме дуговых и тлеющих разрядов в инертных газах.

Актуальность настоящей работы обуславливается активным развитием методов численного моделирования разнообразных источников неравновесной газоразрядной плазмы. Наличие резких пространственных градиентов заряженных и нейтральных частиц ставит вопрос о необходимости корректного учета пленения излучения. При этом, в большинстве моделей пленение излучения учитывается с помощью приближенных эскейп-факторов. Исследования, проведенные в настоящей работе, демонстрируют, что перенос излучения можно эффективно учитывать в рамках сложных моделей неравновесной плазмы на достаточно высоком уровне точности, не прибегая к использованию приближенных факторов. Осуществляется экспериментальная проверка предлагаемых теоретических представлений.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений.

Во **Введении** рассмотрена актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, указывается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** приводится обзор литературы по теме диссертации. В обзоре обсуждаются работы, посвященные развитию подходов к решению

уравнения переноса излучения Холстейна-Бибермана. Рассматриваются работы по неравновесному моделированию дуговых разрядов и поясняется целесообразность учета пленения излучения при моделировании таких разрядов. В заключение первой главы приведен обзор работ по явлению контракции положительного столба тлеющего разряда с обсуждением современного состояния проблемы, отмечается важность учета пленения излучения при моделировании контракции.

Во **второй главе** приведена постановка задачи о переносе излучения в спектральной линии. Продемонстрированы два подхода к решению уравнения Холстейна-Бибермана — использование эскейп-факторов, учитывающих реабсорбцию в точке излучения, но не учитывающих переноса, и матричный метод учета переноса, основанный на замене интегрального оператора переноса излучения системой линейных алгебраических уравнений. Продемонстрированы необходимость учета переноса излучения в задачах с резкими градиентами источников возбуждения, и эффекты, связанные с наличием неоднородности коэффициента поглощения. Диссертантом предложен оригинальный метод получения коэффициентов матрицы переноса, использующий процедуру трассировки лучей через декартову сетку элементарных объемов и позволяющий производить расчеты в произвольной трехмерной геометрии источника плазмы.

В **третьей главе** исследуется влияние пленения резонансного излучения на параметры неравновесной сильноточной дуги. Предлагается многоуровневая столкновительно-радиационная одномерная модель аргоновой плазмы, в которой пленение излучения учитывается путем включения матрицы переноса в общую систему линейных уравнений. Показано, что пленение излучения выносит за пределы зоны возбуждения не только резонансные атомы, но и метастабильные, а также более высоковозбужденные атомы. Это объясняется наличием перемешивания вследствие наличия интенсивных

столкновительно-радиационных процессов. Также проводится анализ перехода дуги из близкого к локальному термодинамически равновесному состоянию в центре разряда к резко неравновесной плазме на периферии столба.

В **четвертой главе** рассматриваются различные подходы к измерению пространственных распределений концентраций поглощающих атомов: метод классической абсорбции и метод соотношений линий, модифицированные с учетом реабсорбции излучения вдоль направления наблюдения. Выполнено сравнение методов путем сопоставления измеренных радиальных распределений метастабильных и резонансных атомов в положительном столбе тлеющего разряда в аргоне.

В **пятой главе** описывается разработанная самосогласованная модель контракции положительного столба разряда в аргоне, учитывающая неоднородный разогрев газа и пленение резонансного излучения. Система уравнений баланса компонент плазмы решается в постановке краевой радиальной задачи, что позволяет получать решение в области гистерезиса, соответствующего переходу между диффузным и контрагированным режимами разряда. Показано, что перенос излучения играет важную роль в формировании радиальных распределений параметров контрагированного разряда, а также токовых характеристик разряда. В то же время, проводится оценка влияния пленения излучения на радиальные распределения диффузного разряда. Для диффузного режима демонстрируется целесообразность использования приближения эффективной вероятности перехода, что, в свою очередь, не является справедливым в контрагированном разряде. Выполнено сравнение с результатами эксперимента по измерению заселенностей возбужденных состояний в системе с высоким пространственным разрешением.

В **Заключении** приведены основные результаты научной работы и сделаны основные выводы.

Приложение А содержит вспомогательные выкладки, связанные с вычислением коэффициентов излучения и поглощения в спектральной линии, используемых в данной работе.

В **Приложении В** приведен подробный вывод коэффициентов матрицы переноса излучения для различных модельных геометрий.

К положительным результатам работы можно отнести обсуждение ряда методических вопросов, связанных с выполнением пространственных распределений излучения спектральных линий от объёмного источника плазмы. В частности, измеряется зависимость аппаратной функции от различных сечений в пределах объёмного источника. Это особенно важно при исследовании радиальной структуры излучения спектральных линий и тормозного континуума в длинном и тонком шнуре контрагированного разряда при наблюдении вдоль оси.

Представляет интерес демонстрация роли высших радиационных и диффузионных мод в формировании параметров разряда. При малых токах в диффузном разряде пространственные распределения источников возбуждения и ионизации близки к фундаментальным модам радиационной и диффузионной задачи. В этом случае хорошо работает приближение эффективных времен жизни. В контрагированном разряде высшие моды играют значительную роль. В работе выполнено сравнение результатов точных решений, учитывающих высшие моды, и традиционных решений, учитывающих только фундаментальную моду.

По теме работы опубликовано 7 статей, в том числе в ведущих журналах в области физики низкотемпературной плазмы, таких как Plasma Sources Science & Technology (1 статья), Physical Review E (1 статья) и Journal of Physics D: Applied Physics (3 статьи).

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

По тексту диссертации имеются следующие замечания:

1. При анализе процессов пленения в дуговом разряде используются данные о распределении параметров плазмы, таких как концентрация, температура и т.д., которые сами зависят от процессов самопоглощения. При этом не обсуждается точность используемых данных.
2. В работе утверждается, что предложенный метод решения уравнения переноса излучения позволяет моделировать трехмерную плазму. Однако проведено моделирование и сравнение с экспериментом только для одномерной геометрии.
3. При сравнении результатов расчетов с экспериментом используются, в основном, данные оптических измерений, которые сами базируются на результатах работы. Хотелось бы иметь сравнение с результатами других, независимых диагностик, которые, в принципе существуют.

Отмеченные недостатки не снижают общего хорошего впечатления от работы. На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Каланова Д.В. является завершенной научно-квалифицированной работой, которая отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Каланов Д.В., безусловно заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики плазмы ИФНиТ СПбПУ



Смирнов

Александр Сергеевич

