

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Ухтинский государственный технический университет»**

УТВЕРЖДАЮ

и.о. проректора по научной, инновационной деятельности и стратегическому развитию

Д.А. Борейко

10 мая 2018



ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Ухтинский Государственный Технический Университет» 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.

Актуальность темы диссертации.

Явления переноса излучения являются важным фактором, определяющим свойства неравновесной газоразрядной плазмы, но зачастую их влиянием ошибочно пренебрегается при построении моделей. В связи с этим, развитие методов, позволяющих корректно учитывать эти явления при моделировании различных плазменных объектов, представляется весьма актуальной задачей. Влияние эффектов переноса излучения на неравновесную плазму с резкими градиентами источников возбуждения наглядно демонстрируется на примере плазмы сильноточной свободно горящей дуги, а также при

рассмотрении явления контракции положительного столба. Теоретические исследования дополнены экспериментальным материалом по измерению заселенностей возбужденных атомов.

Содержание работы.

Работа изложена на 200 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Список литературы содержит 218 наименований.

Первая глава является обзорной. В ней приводится сводка работ, посвященных развитию и современному состоянию методов решения уравнения Холстейна-Бибермана, моделирования сильноточных дуг, исследований контракции положительного столба. Ставится вопрос о необходимости учета пленения излучения при моделировании указанных неравновесных плазменных объектов. Также обсуждаются современные методы измерения заселенностей возбужденных атомов по излучению и поглощению спектральных линий от объемного источника плазмы.

Вторая глава содержит описание метода решения уравнения переноса излучения Бибермана-Холстейна, заключающегося в представлении интегрального члена уравнения в виде матрицы — так называемого «матричного метода». Выполняется сравнение решения задачи с приближенным подходом эффективной вероятности перехода, демонстрируются эффекты учета пространственной неоднородности поглощающих атомов. Помимо анализа вопросов, связанных с матричным методом, разработанным ранее, предлагается новый подход к дискретизации уравнения Бибермана-Холстейна, основанный на трассировке лучей в трехмерной геометрии. Демонстрируются достоинства метода, связанные с возможностью рассмотрения произвольной геометрии источника плазмы и любых коэффициентов поглощения. Также обсуждаются и ограничения существующих методов.

В третьей главе рассматривается вопрос об учете пленения резонансного излучения в рамках столкновительно-радиационной модели сильноточного дугового разряда в аргоне. Показано, что пленение излучения оказывает значительное влияние на такие области сильной неравновесности, как периферия дугового столба. Этот эффект проявляется в виде значительного роста заселенностей резонансных и метастабильных уровней. В то же время, приосевая область не демонстрирует каких-либо значимых отличий.

Четвертая глава содержит интересный экспериментальный и методический материал, посвященный пространственно разрешенным измерениям заселенностей возбужденных атомов по излучению и поглощению спектральных линий положительного столба разряда в аргоне. Рассматриваются методические вопросы, связанные с регистрацией потока излучения от объёмного источника и учетом поправок на реабсорбцию излучения в спектральной линии. Для измерений концентраций метастабильных и резонансных атомов, помимо абсорбционного метода с двумя разрядными источниками, используется метод соотношений потоков излучения от линий, идущих с одного верхнего на различные нижние уровни, анализируется применимость данного метода к пространственным измерениям.

Пятая глава посвящена исследованию влияния пленения резонансного излучения на контракцию положительного столба тлеющего разряда. Построена самосогласованная гидродинамическая модель столба, учитывающая все основные процессы, приводящие к контракции разряда, а также позволяющая получать непрерывные вольт-амперные характеристики. Пленение излучения учитывается путем включения интегральных членов переноса в уравнения баланса резонансных атомов. Продемонстрировано, что пленение излучения приводит к заметному уширению светящегося шнура в режиме контракции, но не играет значительной роли в диффузионном режиме. Также показано, что учет пленения приводит к

смещению контрагированной ветви вольт-амперной характеристики в область более высоких токов, способствуя сглаживанию скачкообразного перехода. Выполнены измерения радиальных распределений метастабильных, резонансных и $2p$ -атомов аргона по излучению и поглощению спектральных линий, измерения радиальных профилей концентрации электронов по излучению тормозного континуума, а также вольт-амперной характеристики разряда в аргоне при давлении в 42 Торр. Сравнение экспериментальных данных с расчетными кривыми демонстрирует состоятельность предлагаемой модели.

Новизна полученных результатов.

Впервые предложен метод расчета пленения излучения в спектральной линии в плазменных объектах произвольной трехмерной конфигурации. Проанализировано влияние пленения излучения на характеристики таких разрядов, как свободно горящая дуга атмосферного давления в аргоне и контрагированный положительный столб тлеющего разряда. Проанализированы вопросы зависимости аппаратной функции регистрируемого сигнала от положения плоскости фокуса в пределах протяженного источника плазмы и применимости метода соотношений линий к измерению пространственных распределений метастабильных и резонансных атомов.

Научная и практическая значимость.

Стоит отметить подробное изложение методов учета переноса излучения, как разработанных ранее и примененных в работе, так и предложенного самим диссертантом. Также достаточно наглядно продемонстрированы роль пленения излучения в формировании пространственных распределений возбужденных атомов при наличии резких пространственных градиентов плотности и удобство включения переноса излучения в более сложные модели газоразрядных объектов. Результаты расчетов для контрагированного разряда проверены путем сопоставления с экспериментом по измерению

излучения спектральных линий с высоким пространственным разрешением. Методические вопросы, связанные с регистрацией излучения от объёмного источника, представляют интерес и для исследователей, занимающихся спектроскопической диагностикой газоразрядной плазмы.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут использоваться и для расчета параметров неравновесной плазмы газовых разрядов других типов, в силу универсальности предлагаемых методов. В свою очередь, разработка наиболее точных моделей газоразрядных объектов является приоритетным направлением для прикладной науки. Так, например, представляет интерес включение переноса излучения в модели плазменных струй атмосферного давления, широко применяющихся в медицине и обработке поверхностей.

Замечания по содержанию диссертации:

1. В параграфе 3.1.2, посвященном учету пленения излучения в столкновительно-радиационной модели дуговой плазмы, приводится оценка эффективной вероятности резонансного перехода. Данная величина зависит от коэффициента поглощения в центре линии и, соответственно, от полуширины линии, которая изменяется по радиусу разряда. Наличие распределений температур и плотностей электронов и нейтральных атомов как входных параметров позволяет более точно рассчитать изменение полуширины по радиусу, чего в работе не проводится.
2. При определении радиальных распределений концентрации электронов в контрагированном положительном столбе по измерению интенсивности тормозного континуума используются профили температуры газа, измеренные для подобной конфигурации разряда в аргоне при приведенном давлении $pR = 90$ Торр см в 1970-х годах. Выполнение измерений

температуры газа в конкретно рассматриваемой конфигурации трубы и разряда представляется более корректным подходом.

3. В параграфе 2.3.2, посвященному расчету коэффициентов матрицы переноса излучения по методу трассировки лучей, в интеграле по частоте (формула (2.45) и далее) присутствует опечатка. Пределы интегрирования от 0 до ∞ соответствуют абсолютной частоте перехода ν , тогда как в формуле

указана частота $\omega = \frac{\nu - \nu_0}{\Delta \nu}$, определяемая на интервале от $-\infty$ до ∞ .

Отмеченные замечания не затрагивают основные результаты работы и не снижают высокой оценки диссертационной работы. Научные положения убедительно аргументированы. Работа хорошо иллюстрирована.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

По теме работы опубликовано 7 статей в журналах, индексируемых Web of Science и Scopus. Результаты также неоднократно представлялись на различных международных конференциях. Автореферат правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

Заключение.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертация Каланова Дмитрия Валерьевича «Радиационные эффекты в неравновесной плазме дуговых и тлеющих разрядов» представляет завершенную научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации 24 сентября 2013 года № 8, а её автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа Каланова Д.В. обсуждена и одобрена на заседании кафедры физики Ухтинского Государственного Технического университета. Протокол № 05 от 07.05.2018 г.

Текст отзыва составил:

Заведующий кафедрой физики
ИФП УГТУ, профессор,
доктор физ.- мат. наук



Некучайев Владимир Орович

Подпись В.О. Некучаева утверждаю

Ученый секретарь ФГБОУ ВО «УГТУ»



Тимохова Оксана Михайловна

ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»

169300 г. Ухта, респ. Коми, ул. Первомайская 13

Тел. (8216) 77-44-33

E-mail: info@ugtu.net