

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИСАН,

д.ф.м.н. Задков В.Н.

«23» января 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Вичева Ильи Юрьевича «Моделирование плазмы в столкновительно-излучательном равновесии», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Диссертационная работа Вичева И.Ю. посвящена разработке и программной реализации алгоритмов для расчета оптических и термодинамических характеристик плазмы с произвольным полем излучения в рамках усовершенствованной модели столкновительно-излучательного равновесия.

Актуальность исследования. Фотолиитография в глубоком ультрафиолете, основанная на плазменных источниках жесткого ультрафиолетового излучения, является основой современной электроники. Кроме того, такие источники имеют большой потенциал для диагностики образцов в материаловедении, биологических исследованиях, медицине и других приложениях. Однако проведение экспериментов на больших установках с высокими плотностями энергии требует огромных затрат, поэтому на передний план выходит численное моделирование процессов, протекающих в излучающей плазме. Зачастую в реализуемых условиях плазма является существенно неравновесной, следовательно, разработка физических моделей и

математических методов для моделирования оптических и термодинамических характеристик неравновесной плазмы является актуальной задачей. Реализация предложенных моделей и алгоритмов в виде вычислительных кодов, написанных с применением современных методов программирования, эффективным распараллеливанием и возможностью проведения расчётов на высокопроизводительных ЭВМ, позволяет использовать их для производственных расчетов. Таким образом, полученные в диссертационной работе результаты являются актуальными и, несомненно, создают задел в развитии прикладной тематики.

Содержание диссертационной работы. Работа состоит из введения, трех глав и заключения общим объемом 165 страниц. Список использованных источников содержит 147 наименований и представлен на 17 страницах.

Во введении представлен обзор литературы и существующих моделей, обоснована актуальность работы, сформулирована цель и научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, а также представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе основное внимание уделяется записи уравнений модели столкновительно-излучательного равновесия и используемых приближений, а также формулировке алгоритмов для расчета оптических и термодинамических свойств плазмы с произвольным полем излучения.

Во второй главе основное внимание уделяется описанию алгоритма поиска согласованного решения для уравнения переноса с кинетической системой в стационарном приближении. Записаны решения уравнения переноса излучения для ряда одномерных модельных систем различного типа симметрии – плоской, цилиндрической и сферической.

В третьей главе приводятся результаты исследования используемых моделей и приближений, а также верификации разработанных программ путем сравнения получаемых результатов с экспериментальными измерениями, аналитическими решениями и другими программами.

В заключении подводятся итоги выполненной работы, и формулируются основные результаты.

Научная новизна. В рамках диссертационной работы создана усовершенствованная модель столкновительно-излучательного равновесия, в которой учтены эффекты плотности и наличие горячих электронов. На ее основе разработан и реализован в коде алгоритм расчета оптических и термодинамических характеристик плазмы с произвольным полем излучения, а также оригинальный алгоритм нахождения согласованного решения уравнения переноса излучения в одномерной геометрии и кинетических уравнений.

Теоретическая и практическая значимость. Разработанные алгоритмы для расчёта оптических и термодинамических характеристик плазмы с произвольным полем излучения в рамках модели столкновительно-излучательного равновесия, а также их реализация в виде отдельных программных модулей с возможностью запуска на современных ЭВМ с параллельной архитектурой представляют интерес в качестве основы для внедрения в одномерные коды радиационной газовой динамики. Предлагается использовать разработанные программы для подготовки таблиц оптических и термодинамических свойств веществ в широком диапазоне температур и плотностей. Такие таблицы свойств могут применяться в двух- и трехмерных кодах радиационной газовой динамики для выполнения производственных расчётов и описания экспериментальных данных, получаемых на современных высокоэнергетических установках.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Модель, используемые приближения, предложенные алгоритмы, а также программы, разработанные на их основе, прошли всестороннюю верификацию путем сравнения с экспериментальными данными, аналитическими решениями и результатами расчетов других научных коллективов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на более чем тридцати всероссийских и международных конференциях и семинарах, а также отражены в 20 печатных работах: 12 из них – статьи в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science, 13 из них в рекомендованных изданиях из списка ВАК. На разработанные программы получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Замечания по диссертационной работе. Со стороны ведущей организации к работе имеется ряд замечаний.

1. Решение уравнения переноса излучения для неоднородного плоского слоя можно получить более простым способом, чем тот, что приведён в диссертации (секция 2.2.2., стр. 72 – 78): непосредственно из общего решения путём вычисления соответствующего интеграла (секция 2.1., стр. 68) для плоской системы, состоящей из N однородных подслоев.
2. В диссертации приводятся решения уравнения переноса излучения для однородных сферического (секция 2.3.1., стр. 78 – 79) и цилиндрического источников (секция 2.4.1., стр. 83 – 86), но далее нигде в тексте эти решения не используются.
3. В кодах радиационной газовой динамики часто используются табулированные или аналитическим образом аппроксимированные усредненные коэффициенты поглощения, полученные в приближении локального термодинамического равновесия, которые применимы для

широкого круга задач. Но стоит отметить, что в последнее время большой интерес вызывает именно неравновесная плазма. В тексте диссертации говорится, что получаемые с помощью разработанных программ таблицы оптических свойств используются в сложных кодах радиационной газовой динамики, но ничего не сказано про то, каким образом с помощью таблиц учитываются эффекты неравновесности плазмы.

Приведенные замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов, а также общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение ведущей организации. Тема работы является актуальной и соответствует специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Кандидатская диссертационная работа Ильи Юрьевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу в области моделирования оптических и термодинамических свойств веществ в рамках модели столкновительно-излучательного равновесия. Разработанные алгоритмы и комплекс расчетных программ вносят существенный вклад в развитие математического моделирования характеристик неравновесной плазмы, что определяет высокую научную значимость работы. Кроме того, работа Ильи Юрьевича имеет огромную практическую значимость. Разработанный комплекс вычислительных программ позволяет моделировать плазменные источники экстремального ультрафиолетового излучения для литографии нового поколения, которая играет важную роль в развитии отечественной полупроводниковой промышленности. Продемонстрированные в работе результаты свидетельствуют о способности соискателя решать сложные научные задачи. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание и основные результаты.

На основании вышеизложенного считаем, что работа «Моделирование плазмы в столкновительно-излучательном равновесии» в полной мере соответствует требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор – Вичев Илья Юрьевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв о диссертационной работе Вичева И.Ю. заслушан и одобрен на расширенном семинаре отдела атомной спектроскопии ИСАН, протокол №1 от 16.01.2023 г.

Отзыв составил Медведев Вячеслав Валериевич

Заведующий Отделом атомной спектроскопии ИСАН,

Кандидат физ.-мат. наук

В.В. Медведев

«16» января 2023 г.

Подпись Медведева В.В. удостоверяю:

Учёный секретарь ИСАН, кф.-м.н.



Кильдиярова Р.Р.

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840, Российская Федерация, г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5

Телефон: +7 (495) 8510579

Сайт организации: <https://isan.troitsk.ru/>

Электронная почта: isan@isan.troitsk.ru