

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук Закусина Александра Сергеевича
на тему: «Лабораторное моделирование и диагностика газоплазменных
сред, представляющих астрофизический интерес»
по специальности 1.4.4. Физическая химия

Представленная диссертационная работа посвящена исследованию излучательных процессов и развитию методов диагностики плазмы, образованной на поверхности твёрдых мишеней наносекундными лазерными импульсами при различных давлениях окружающего газа. Эмиссионные спектры лазерной плазмы являются источником информации об элементном и молекулярном составе исследуемого вещества, и позволяют проводить количественный и качественный элементный анализ, широко используемый в настоящее время. Интенсивность спектров зависит от многих параметров, среди которых, прежде всего, выделяют температуру и электронную плотность, последние могут меняться в широких пределах, поэтому изменчивость спектров лазерной плазмы успешно используется для лабораторного моделирования спектров объектов, движущихся со сверхзвуковыми скоростями, например, объектов в атмосфере Земли. Важной проблемой в диагностике лазерной плазмы является определение температуры и электронной плотности. Среди диагностических методов, использующих эмиссионные спектры, чаще всего встречаются методы, основанные на интенсивности, штарковском сдвиге и уширении линий, но при этом теоретические и экспериментальные данные, позволяющие определять электронную плотность, ограничены относительно малым числом линий элемента, а для температуры, полученной из интенсивности линий, требуется наличие локального термодинамического равновесия. В данной работе автором сравниваются спектры лазерной плазмы и метеоров, исследуется флуоресценция атомов и молекул в плазме, проводится диагностика плазмы на основе спектров томсоновского рассеяния и атомной флуоресценции, прогнозируются параметры штарковского сдвига и

уширения линий, используя методы машинного обучения. Поэтому **актуальность** темы исследований не вызывает сомнений.

В качестве **новизны** исследований можно выделить следующее. Наилучшее совпадение спектров лазерной плазмы и метеора на высоте 39 км наблюдается для давления 100 Торр, задержке регистрации 15 мкс и энергии лазерного импульса 8,1 мДж, что означает двадцати-тридцатикратное превышение давления газа в хвосте метеора над давлением воздуха на этой высоте. Разработаны схемы нерезонансной флуоресценции CaO, Ca I, Fe I, FeO и Ti I, при этом интенсивность линий флуоресценции многократно превышает интенсивность эмиссионных линий. Разработанная схема флуоресценции и экспериментальная установка позволили получить профиль температуры по данным флуоресценции Ti I с пространственным разрешением 0.4 мм. Построенная автором карта распределения интенсивности флуоресценции CaO и Ca I в лазерной плазме позволила сделать вывод о растущей с давлением воздуха роли реакции окисления Ca на периферии плазмы. Проведена диагностика плазмы пробоя воздуха на основе спектров томсоновского рассеяния, измерены штарковские сдвиги и уширения линий N II и O II. На основе этих данных создана модель машинного обучения, которая предсказывает величины штарковского сдвига и уширения с точностью, сравнимой с точностью экспериментальных данных.

Обоснованность научных положений и выводов достигнута их соответствием современным представлениям о процессах, происходящих при взаимодействии наносекундного лазерного излучения с атомами, ионами и молекулами в плазме.

Достоверность научных положений и выводов подтверждается использованием апробированных спектральных методов исследования, использованием сертифицированного научного оборудования и публикациями в ведущих рецензируемых научных международных

журналах, включая находящиеся в первом квартиле баз данных Scopus и Web of Science.

Диссертация состоит из пяти глав (включая введение), заключения, списка сокращений и обозначений и списка цитируемой литературы, содержащего 214 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 153 страницы. Работа содержит 57 рисунков и 19 таблиц.

Во **введении (первой главе)** сформулирована актуальность и значимость темы исследования, задача и цель работы и положения, выносимые на защиту. Обсуждена теоретическая и практическая значимость представленного материала, а также личный вклад автора.

Во **второй главе** рассматриваются физические основы используемых в работе методов лазерной спектроскопии, представлено описание подходов по лабораторному моделированию метеорных процессов с использованием лазерной плазмы, показано применение методов машинного обучения для решения задач в области спектроскопии.

В **третьей главе** описываются экспериментальная установка и ее модификации, разработанные схемы атомной и молекулярной лазерной флуоресценции, методы диагностики плазмы по спектрам эмиссии и томсоновского рассеяния, а также модели машинного обучения.

В **четвертой главе** представлены результаты поиска экспериментальных условий, в которых эмиссионные спектры лазерной плазмы наилучшим образом совпадают со спектрами плазмы метеора в верхних слоях атмосферы. Показаны результаты применения методов машинного обучения для предсказания параметров штарковского сдвига и уширения и результаты диагностики плазмы по спектрам томсоновского рассеяния, а также исследовано распределения частиц и градиента температуры в плазме по данным атомной и молекулярной лазерной флуоресценции.

В **заключение** диссертации представлены основные результаты и выводы по проделанной работе.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы, а ее основные положения опубликованы в 7 статьях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.4.4 – Физическая химия.

Считаю, что диссертация **соответствует специальности 1.4.4. Физическая химия**, а именно следующим ее направлениям:

1. Экспериментально-теоретическое определение энергетических и структурно-динамических параметров строения молекул и молекулярных соединений, а также их спектральных характеристик.
2. Изучение физико-химических свойств изолированных молекул и молекулярных соединений при воздействии на них внешних электромагнитных полей, потока заряженных частиц, а также экстремально высоких/низких температурах и давлениях.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Расчеты сдвига и уширения эмиссионных линий представляют собой сложную квантово-механическую задачу, поэтому предсказание величин штарковского сдвига и уширения поможет как расширить список линий для диагностики плазмы, так и определить механизмы, влияющие на уширение и сдвиг, и, в некоторых случаях, повысит точность диагностики. Спектроскопия томсоновского рассеяния и флуоресценции могут стать дополнительным инструментом для диагностики плазмы с высоким пространственным разрешением, полученные в диссертации схемы флуоресценции могут повысить точность лазерного спектрального анализа и понизить пределы обнаружения элементов.

К недостаткам работы следует отнести следующее:

1. В формуле (37), стр. 28 спектральная объёмная плотность энергии

измеряется в странных единицах $\frac{\text{Дж} \cdot \text{с}^4}{\text{м}^8}$.

2. Неверно сформулирована реакция трехчастичной рекомбинации на стр. 29: «Результаты сканирования позволили ... предположить, что основной способ образования нейтральных атомов гадолиния в ЛИП – это трехчастичное взаимодействие ионов гадолиния и атомов окружающего газа». Для условий работы [84], трехчастичная рекомбинация идет между ионом, электроном и третьим телом, в качестве которого могут выступать нейтральный атом/молекула или другой электрон.
3. На рис. 18 не понятен резкий рост интенсивности фона флуоресценции при переходе от 419 к 410 нм.
4. Ошибка в подписи на рис. 20. Длина волны 408.43 нм соответствует переходу между колебательными уровнями (0,2), но не (0,1).
5. При решении системы дифференциальных уравнений (38) и (40) для трёхуровневой схемы флуоресценции, утверждается, что вероятности индуцированных переходов для уровней 1 и 2 на пять порядков превосходят вероятности спонтанных переходов, т.е. населённость уровня, с которого наблюдается флуоресценция, не должна зависеть от вероятности спонтанного перехода. Непонятно, почему тогда населённость этого уровня в формуле (42) зависит от вероятностей спонтанного перехода A_{21} и A_{23} через переменные ξ_1 и ξ_2 . Если же населённость уровня, с которого наблюдается флуоресценция, зависит от вероятностей спонтанного перехода, тогда при рассмотрении кинетики населённостей уровней необходимо добавить члены, отвечающие за реакции с участием электронов. Например, в схеме флуоресценции Б (рис. 54), константа скорости девозбуждения электронным ударом для перехода $3d^24s(^4F)4d \rightarrow ^5G (J=6) - 3d^24s(^4F)5s \rightarrow ^5F (J=5)$ при $T = 5000 \text{ К}$ равна $2.4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$, учитывая полученную в работе электронную плотность порядка 10^{16} см^{-3} , получаем скорость

девозбуждения порядка $2.4 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$, данное значение почти на три порядка превосходит вероятности спонтанного перехода $A_{21} = 7.4 \cdot 10^7$ и $A_{23} = 5.1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.

6. В диссертации отсутствует оценка интенсивности лазерных импульсов, что затрудняет сравнение с данными других работ и поднимает вопросы о других возможных физических эффектах, например, возникновение боковых компонент, связанных с Раби-осцилляциями между уровнями перехода, близкого по длине волны к длине волны зондирующего импульса. Неясно, насколько стабилен по длине волны и интенсивности сигнал томсоновского рассеяния при изменении экспериментальных параметров.
7. Сомнительным представляется утверждение о росте температуры в периферической области плазмы, который связан с прохождением ударной волны, вызывающей локальный разогрев на границе плазмы. Ударная волна в воздухе формируется при сверхзвуковом расширении лазерной плазмы, генерируемой на поверхности мишени, и затем происходит отрыв фронта ударной волны от области плазмы, в цитируемой в диссертации работе [214] это происходит на расстоянии менее 1 мм и временной задержке менее 100 нс для давления 10 кПа. Таким образом, при использованной в диссертации задержке 5 мкс и давлении 13.3 кПа ударная волна не могла влиять на параметры плазмы.

Вместе с тем, указанные недостатки не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.4.4. Физическая химия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно

требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Закусин Александр Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
лазерных методов исследования вещества
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт автоматики и процессов
управления ДВО РАН

Ильин Алексей Анатольевич

27.05.2025

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

690041, Приморский край г. Владивосток, ул. Радио, д. 5,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Тел.: 84232310911; e-mail: director@iacp.dvo.ru