

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор Федерального государственного
бюджетного учреждения высшего
образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»,
начальник управления научной политики,
доктор физ.-мат. наук, профессор

А.А. Федянин

«26» 09 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова» на диссертационную работу Лагунова Владимира Владимировича «Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Диссертационная работа Лагунова Владимира Владимировича «Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме» посвящена исследованию физико-химических свойств плазмы тлеющего разряда в трубке в неравновесных условиях, формирующихся в результате объемных и гетерогенных процессов, методом диодной лазерной спектроскопии поглощения.

Это достаточно общая задача при создании и реализации режимов работы плазменных реакторов различного назначения, включая плазмохимические и энергетические реакторы, в том числе термоядерные. На таких установках существует потребность в методах прямого не инвазивного контроля концентраций примесей в плазмообразующем газе и плазме. Особенно острой является проблема загрязнений плазмы в объеме молекулами воды и их производными – молекулами кислорода.

Причины появления молекул воды в плазме могут быть связаны как с течениями через стенку при высоких тепловых нагрузках в установках термоядерной энергетики, так и с остаточными молекулами воды, обладающими высокой адгезией на поверхностях элементов камеры и ее инфраструктуры, наличие которых характерно для любых разрядных вакуумных систем. Поэтому исследование поведения молекул воды и кислорода, связанных взаимными превращениями в плазме разряда и адгезионных свойств паров воды на поверхности представляют интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения.

Важным условием возможности таких исследований является решение общей для неравновесной плазмохимии проблемы определения концентраций частиц непосредственно в плазме. Широко известные методы газоанализа типа масс-спектрометрии, хроматографии и др. предполагают анализ проб, изъятых из плазмы, что некорректно даже для стабильных в нормальных условиях частиц. Неинвазивные эмиссионные методы хорошо отработаны для диагностики равновесной плазмы, например, в дугах и плазмотронах, также требуют серьезного анализа применимости при нарушениях равновесия.

Одним из перспективных методов неинвазивного количественного анализа концентраций частиц без отбора проб является метод диодной лазерной спектроскопии (ДЛС). Он заключается в исследовании спектров поглощения излучения перестраиваемых диодных лазеров. Детальных исследований гетерогенных взаимодействий частиц воды и кислорода в газе и плазме методом диодной лазерной спектроскопии до настоящего времени проведено не было.

В диссертации В. В. Лагунова исследуются механизмы и скорости процессов адсорбции молекул воды на кварце. Проводится анализ индивидуальных и коррелированных изменений концентраций H_2O , HDO , O_2 в разряде, баланса элементов, влияния состояния поверхности кварца на объемный химический состав плазмы. Для решения последней задачи был разработан оригинальный двухканальный спектрометр, позволяющий исследовать поведение концентраций нескольких частиц одновременно с временным разрешением.

Несомненно, тема представленной диссертации актуальна для физики низкотемпературной плазмы и техники диодной лазерной спектроскопии.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Полный объем работы составляет 136 страниц, включая 34 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 107 наименований.

Во **введении** сформулированы актуальность, цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, достоверность и обоснованность результатов, представлена информация о публикациях и апробации работы.

Первая глава посвящена описанию экспериментальной техники и методологии, использовавшейся в диссертации. Представлен новый тип двухканального диодного лазерного спектрометра, разработанного в ходе диссертационного исследования. Спектрометр предназначен для исследования динамики концентраций двух взаимопревращающихся частиц в плазме газового разряда, имеющих существенно различающиеся частоты в спектре поглощения. Конструкция спектрометра включает два диодных лазера и общий внешний оптический резонатор с неосевой юстировкой, что повышает спектральное разрешение. Для разделения оптических каналов используется дихроичная оптика.

Вторая глава посвящена исследованию явления искажения формы контура линии поглощения при быстрой ($\geq 10^3 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) скорости перестройки зондирующего излучения при использовании высокодобротного внешнего резонатора. Разработана физическая модель, интерпретирующая искаженные спектры как результат свертки истинного статического спектра с аппаратной функцией резонатора. Ключевым фактором проявления искажений является конечное время жизни фотонов в резонаторе. Отмечается, что, несмотря на искажения, интегральное поглощение остается неизменным. Разработанная модель позволяет оптимизировать режимы регистрации частиц исходя из компромисса между быстродействием и чувствительностью к измерениям поглощения для конкретных спектров.

Третья глава посвящена исследованию гетерогенных процессов адсорбции и десорбции воды на кварце. Исследован переход молекул воды между газовой фазой и поверхностью кварца до достижения равновесия. Исследования динамики таких процессов возможно только в условиях, когда число свободных молекул сравнимо с количеством частиц в монослое на стенке. Такие измерения представляются возможными только методом ДЛС и выполняются впервые.

Построена кинетическая модель процессов, выявлены их характерные времена, определена роль частиц, адсорбированных на стенку по разным физическим механизмам. Установлено, что баланс частиц сохраняется с точностью 4-5%. Это показывает, что процессы адсорбции-десорбции воды с кварца (независимо от механизма) не сопровождаются химическими превращениями.

Четвертая глава посвящена исследованию гетерогенных взаимодействий молекул кислорода. Исследованы особенности поведения частиц, взаимодействующих с поверхностью при неравновесных условиях в объеме в условиях наличия разряда. Проанализировано каким образом предварительная активация поверхности разрядной камеры атомами кислорода, наработанными в разряде в смесях гелия с кислородом, влияет на способность к взаимодействию с ней свободных частиц как в нейтральном газе, так и в плазме разряда

Показано, что предварительный разряд изменяет адсорбционные свойства кварцевой поверхности, влияя на динамику поведения объемной плотности молекулярного кислорода. Десорбция кислорода с активированной стенки происходит либо при вакуумировании (~ 10 ч), либо при взаимодействии с добавленными частицами. Активированная поверхность способна восстанавливать молекулы O_2 из адсорбированных атомов даже без разряда, но эффективность такого процесса зависит от типа добавленных в газовую фазу частиц.

Пятая глава диссертации посвящена исследованию коррелированных изменений концентраций молекул воды и кислорода в полном разрядном цикле. Впервые исследована динамика коррелированного поведения молекул кислорода и воды в процессе напуска газов, непосредственно в разряде и его послесвечении, выявлено влияние поверхности на зависимости их объемной плотности от времени.

Разработана 0D модель кинетики плазмохимических процессов, которая позволила интерпретировать динамику поведения объемных плотностей молекул. Показано, что наблюдаемый в эксперименте дисбаланс частиц водорода объясняется новой ранее не изучавшейся гетерогенной реакцией: свободные атомы кислорода из разряда взаимодействуют с адсорбированными молекулами воды на кварцевой поверхности. Этот процесс приводит к выделению в плазму молекулярного водорода и кислорода, что описывает наблюдаемое нарушение баланса элементов, объясняет аномалии в динамике объемной плотности, подтверждает ключевую роль поверхностных процессов в неравновесной плазмохимии в трубке.

Шестая глава диссертации посвящена анализу поведения изотопического соотношения H_2O/HDO в разряде в смесях гелия с водой и дейтерием. Обнаружено, что в условиях эксперимента соотношение концентраций изотопомеров в разряде сохраняется. Это связано с протеканием активных обменных процессов между стенкой и объемом трубки.

Приводится сравнение измерений концентрации воды в разрядах с гелием при разных токах, проведенных разными методами: ДЛС и оптической актинометрии. Показано, что абсолютный метод ДЛС также хорошо подходит для проверки результатов измерений косвенными методами.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы.

В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующее:

1. Созданный оригинальный метод двухволновой диодной лазерной спектроскопии позволяет проводить чувствительный мониторинг взаимопревращающихся пар молекул в неравновесных условиях с временным разрешением.

2. Построена модель эффекта нестационарного искажения контура линии поглощения. Модель позволяет оптимизировать комбинации времени корректной регистрации спектра и параметров резонатора для требуемой чувствительности измерений поглощения.

3. Определены характеристики процесса адсорбции паров воды поверхностью кварца. В балансе частиц основную роль играют химически адсорбированные частицы. Физический механизм обеспечивает быстрый обмен между поверхностью и объемом. Определены скорости физической и химической адсорбции-десорбции.

4. Параллельный мониторинг поведения концентраций частиц в смеси молекул воды и кислорода по поглощению света в разных областях спектра в полном цикле заполнения реактора газом, последующего газового разряда и его послесвечения выявил нарушение баланса частиц в объеме. Построенная однородная плазмохимическая модель разряда позволила объяснить это нарушение гетерогенной реакцией атомарного кислорода с адсорбированными молекулами воды.

5. Для пары изотопомеров молекул простой H_2O и образующихся из них в плазме молекул тяжелой HDO воды во влажном дейтерии D_2 установлено, что в изученном диапазоне изменений при избытке дейтерия устанавливается и сохраняется соотношение концентраций $N_{\text{H}_2\text{O}}/N_{\text{HDO}}$.

Отметим следующие замечания, возникшие в ходе ознакомления с работой.

1. Недостаточно подробно изложена группа вопросов, относящаяся к оптимизации скорости перестройки и скорости записи спектров в различных экспериментальных условиях.

2. В работе отсутствует прямое сопоставление результатов измерений, полученных при осевой и неосевой юстировке аналитического резонатора.

3. В работе недостаточно освещена роль предварительной подготовки стенки разрядной камеры в процессе измерений.

4. В тексте диссертации встречаются отдельные опечатки, несмотря на в целом хорошее качество изложения материала.

Отмеченные замечания не влияют на общую высокую положительную оценку работы и не снижают ценность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечиваются высоким уровнем проведенных экспериментов, обширной статистикой и согласованностью результатов измерений, проведенных разными методами. Результаты работы прошли апробацию на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых высокорейтинговых журналах.

Результаты диссертации перспективны для практического применения. Так, в частности, изученные в работе критерии для скорости перестройки частоты в

диодных лазерных спектрометрах и разработанная модель являются довольно универсальными и могут использоваться при разработке и проектировании спектральных систем с внешним резонатором. Результаты являются новыми и могут быть использованы в учебных курсах, в которых рассматриваются спектральные методики. Обнаруженную доминирующую роль гетерогенных процессов в разрядах в ограниченном объеме в условиях пониженной объемной плотности частиц следует принимать во внимание разработчикам и пользователям плазмохимических установок, так как эти процессы могут влиять на чистоту продуктов, стабильности выхода и эффективность реакций. Разработанные модели адсорбции-десорбции и плазмохимическая модель позволяют численно прогнозировать объемные и поверхностные плотности частиц в условиях, подобных описанным в диссертации.

Основные результаты работы являются новыми и могут быть рекомендованы к использованию в научных и промышленных организациях, занимающихся исследованиями плазмы (ОИВТ РАН, ИОФ РАН, ИСЭ РАН, МРТИ РАН, ИНХС РАН, ТРИНИТИ, МГУ, МГТУ, МИФИ, ИГХТУ, НИЦ "Курчатовский институт" и др.).

Материал диссертации хорошо и понятно изложен, и наглядно проиллюстрирован. Полученные результаты опубликованы в 14 работах в отечественных и зарубежных научных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus, и входящих в перечень ВАК РФ. Результаты работы неоднократно докладывались на ведущих международных и российских научных конференциях по тематике взаимодействия, физике плазмы, лазерной физике и оптике.

Содержание диссертационной работы Лагунова В. В. «Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме» соответствует специальности 1.3.6 - оптика. Автореферат полно и правильно отражает основные результаты и выводы работы и соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Лагунова Владимира Владимировича «Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Лагунов Владимир Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 - Оптика.

Доклад Лагунова В. В. по материалам диссертации заслушан на заседании кафедры Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова "18" сентября 2025 г.

Отзыв на диссертацию составлен заместителем заведующего кафедрой Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова кандидатом физико-математических наук, доцентом Каменских Ириной Александровной и доктором физико-математических наук, профессором кафедры Федосеевым Анатолием Ивановичем. Отзыв одобрен на заседании кафедры Оптики, спектроскопии и физики наносистем Физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова "18" сентября 2025 г

Заместитель заведующего кафедрой
Оптики, спектроскопии и физики наносистем
Физического факультета МГУ,
к.ф.-м.н., доцент
Каменских Ирина Александровна,
тел.: +7 495 939-31-69
e-mail: ikamenskikh@bk.ru

Профессор кафедры
Оптики, спектроскопии и физики наносистем
Физического факультета МГУ
д.ф.-м.н.,
Федосеев Анатолий Иванович
тел.: +7 495 939-59-81
e-mail: spekl@phys.msu.ru

И.о. декана физического факультета МГУ
д.ф.-м.н., профессор
Белокуров Владимир Викторович
тел.: +7 495 939-31-60
e-mail: info.ff@org.msu.ru

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова» (физический факультет), 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2.

Список основных работ сотрудников ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ) по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Abrashitov G.N., Gruzdev G.A., Yakunin V.G., Savinov V.P., Karpukhina O.V., Timoshenko V.Yu. Effect of Cold Atmospheric Pressure Gas-Discharge Plasma on Cellular Model of *Paramecium caudatum* in the Study of Antioxidant Properties of Mexidol // *Physics of Atomic Nuclei*. 2023. Vol. 86, No. 12. P. 2719–2723. DOI: 10.1134/s1063778823110029.
2. Golovin M.L., Mazina S.E., Fedorov A.S., Yakunin V.G., Savinov V.P., Timoshenko V.Yu. Influence of low-temperature plasma on green algae culture // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 407. Art. 01014. P. 1–5. DOI: 10.1051/e3sconf/202340701014.
3. Fronya A., Antonenko S., Karpov N., Pokryshkin N., Eremina A., Kharin A., Yakunin V.G., Savinov V.P., Garmash A., Kargin N., Klimentov S., Timoshenko V., Kabashin A.V. Pulsed laser deposition in He-N₂ gaseous mixtures for the synthesis of photoluminescent Si and Ge nanoparticles for bioimaging // *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12410. Art. 1241008. P. 1–9. DOI: 10.1117/12.2655137.
4. Karpyuk P., Korzhik M., Fedorov A., Kamenskikh I., Komendo I., Kuznetsova D., Leksina E., Mechinsky V., Pustovarov V., Smyslova V., Retivov V.M., Talochka Y., Tavruncov D., Vasil'ev A.N. The Saturation of the Response to an Electron Beam of Ce- and Tb-Doped GYAGG Phosphors for Indirect β -Voltaics // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13. P. 3323. DOI: 10.3390/app13053323.
5. Дибольский Р.В., Туркин А.Н., Морозюк А.М. Излучатели лазерных диодов с длительностью оптического импульса менее 10 нс // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. 2024. No. 3. Art. 2431104.
6. Shibanov D.R., Lopaev D.V., Maslakov K.I., Konnikova M.R., Rakhimov A.T. SiO₂ sputtering by low-energy Ar⁺, Kr⁺, and Xe⁺ ions in plasma conditions // *Vacuum*. 2025. Vol. 231. Art. 113767. DOI: 10.1016/j.vacuum.2024.113767.
7. Ziganshin I., Galiullin K.R., Lopaev D., Kirillov E.A., Rakhimov A.T. VUV radiation impact on O(3P) atom surface loss on Pyrex in dc discharge in mixtures of O₂ with Ar, Kr and Xe // *Plasma Sources Science and Technology*. 2025. Vol. 34. Art. 035007. DOI: 10.1088/1361-6595/adbc1b.
8. Строкова Ю.А., Свяховский С.Е., Салецкий А.М. Исследование спектральной зависимости времени жизни флуоресценции акридинового оранжевого в одномерных фотонных кристаллах // *Оптика и спектроскопия*. 2024. Vol. 132, No. 9. P. 895–901.
9. Строкова Ю.А., Салецкий А.М. Исследование спектрально-флуоресцентных характеристик молекул родамина 6Ж, внедренных в различные слои одномерных фотонных кристаллов на основе полимерных пленок // *Оптика и спектроскопия*. 2022. Vol. 130, No. 12. P. 1817–1825. DOI: 10.21883/OS.2022.12.54086.3859-22.

10. Давыдов Ф.Д., Кулешова А.А., Салецкий А.М. Влияние pH на спектрально-люминесцентные характеристики "мягкой" белковой короны наночастиц серебра // Журнал прикладной спектроскопии. 2022. Vol. 89, No. 2. P. 230–237.
11. Гарматина А.А., Мареев Е.И., Коршунов А.А., Можаяева М.Д., Минаев Н.В., Муслимов А.Е., Хмелинин Д.Н., Асадчиков В.Е., Гордиенко В.М. Микроскопия второй гармоники из приповерхностной плазмы зажигаемой остросфокусированным пучком фемтосекундного волоконного лазера // Оптика и спектроскопия. 2024. Vol. 132, No. 1. P. 34–41. DOI: 10.61011/OS.2024.01.57546.11-24.
12. Garmatina A., Mareev E., Minaev N., Asharchuk N., Semenov T., Mozhaeva M., Korshunov A., Krivonosov Yu, Dyachkova I., Buzmakov A., Koldaev V., Zolotov D., Dymshits Yu, Gordienko V., Asadchikov V. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography // Optics Express. 2023. Vol. 31, No. 26. P. 44259–44272. DOI: 10.1364/OE.496123.
13. Chaschin M.V., Shcheglov P.A., Tausenev A.A., Nazarov M.M., Gordienko V.M. Spectra of optical harmonics 2 and 3/2 at subrelativistic laser-plasma generation of X-ray radiation // Optics and Spectroscopy. 2023. Vol. 131, No. 2. P. 176–180. DOI: 10.61011/EOS.2023.02.55781.19-23
14. Garmatina A.A., Asadchikov V.E., Buzmakov A.V., Dyachkova I.G., Baranov A.I., Myasnikov D.V., Minaev N.V., Gordienko V.M. Femtosecond high repetition rate fiber laser-driven plasma microfocus X-ray source for imaging applications // IEEE Xplore. 2022. DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840057.
15. Lazarev A.V., Semenov T.A., Belega E.D., Gordienko V.M. Dynamics of expanding gas from supercritical state in conical nozzle and cluster formation // Journal of Supercritical Fluids. 2022. Vol. 187. Art. 105631. DOI: 10.1016/j.supflu.2022.105631.