Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук

На правах рукописи

Лагунов Владимир Владимирович

Количественная спектроскопия молекул воды и кислорода, участвующих в объемных и гетерогенных процессах в газе и плазме

Специальность 1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственного бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН).

Научный руководитель:

Очкин Владимир Николаевич

доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Степанов Евгений Валерьевич
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом экологических и медицинских проблем Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Трушкин Николай Иванович
доктор физико-математических наук, начальник лаборатории физики плазмы Отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных исследований Государственного научного центра Российской Федерации – Троицкого института инновационных и термоядерных исследований

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится «20» октября 2025 года в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.1.262.01 на базе ФИАН по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института имени П.Н. Лебедева РАН и на сайте института www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.1.262.01,
доктор физико-математических наук А.С. Золотько

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Постоянно расширяется круг задач газоанализа, требующих обновления методов их решения. Эти задачи включают в себя контроль концентрации примесей и загрязнений в атмосфере [1], в биологии и медицине, поиск биомаркеров патогенных организмов в выдохе человека [2], диагностику реакций горения для повышения эффективности работы двигателей внутреннего сгорания и мониторинга работы реактивных двигателей с помощью анализа состава их газовых потоков [3] и т.д. Актуальны задачи обнаружения паров взрывчатых и наркотических средств в самых различных обстоятельствах. На промышленных производствах мониторинг газовых составляющих повышает эффективности технологических процессов и позволяет контролировать воздействие на окружающую среду, обеспечивает безопасность персонала [4].

Разработки методов и средств газоанализа уже давно сформировали самостоятельное научно-техническое направление. Применяются как достаточно универсальные методы типа электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), масс-спектрометрии и хроматографии, так и специальные приемы, нацеленные на детектирование лишь отдельных химических соединений в ограниченном диапазоне условий, например, с помощью специальных контактных сенсоров, работающих на различных принципах. Соответствующие средства разрабатываются, тиражируются в массовом порядке на производствах различного уровня и занимают глубокую нишу на рынке. В подавляющем большинстве случаев эти и другие средства предполагают возможность анализа пробы из газовой среды с сохранением ее состава при помещении в анализатор, что, действительно, во многих случаям оправдано, но нередко это и не так. Можно отметить, как минимум, две группы связанных с этим ограничений.

Первая связана с воздействием прибора на состав пробы, если она даже соответствует составу объекта и введена в прибор корректно. Например, в масс-спектрометрии проба подвергается воздействию пучка электронов и возникают вопросы соотнесения состава ионов с нейтральным составом исходной газовой смеси. Похожие вопросы возникают в отношении разделения частиц в колонках

хроматографов, селективности поверхностей сенсоров и др. Благодаря большому опыту применений таких распространенных анализаторов, эти аппаратные ограничения часто удается обходить путем специальных калибровок и протоколов измерений.

Другие, более фундаментальные, ограничения в области газового анализа связаны с условиями равновесия физических и химических параметров в объекте, которые в пробе воспроизвести крайне сложно. Отсутствие равновесия объединяет сами такие объекты со средствами их исследования в особый класс. Он достаточно широк и все более привлекает к себе внимание по мере развития энергетически экономных технологий, в том числе, связанных с неравновесными явлениями в разреженной газовой или плазменной фазах. Они играют ключевую роль, например, в быстрых потоках (незавершенность релаксации энергий частиц и химических циклов с их участием), в плазме (следствие отрыва энергий заряженных и нейтральных частиц), при гетерогенных взаимодействиях частиц газовой фазы с поверхностями (физические и химические механизмы связывания, пристеночные процессы, формировании взвесей микро- и наночастиц, капель и кластеров), создании инверсных состояний в различных типах газовых лазеров. Обсуждается экологичное плазмохимическое производство водорода в замкнутом цикле конверсии паров воды на окиси углерода, образуемой в разряде в углекислом газе. Создаются уже достаточно продвинутые экспериментальные образцы термоядерных реакторов с нагревом горячей плазмы электрическим разрядом, в которых критическую роль играет пристеночная низкотемпературная неравновесная плазма. Быстро развивается техника гиперзвукового движения тел в разреженных газах с образованием плазмы вблизи их поверхностей.

Эти и многие другие разработки требуют поддержки средствами диагностики, не связанными со вмешательством в объект. К таковым, в первую очередь, относятся хорошо известные методы оптической спектроскопии. Опыт, однако, показывает, что их применение к диагностике неравновесных сред адекватно лишь при условии одновременного понимания и учета как механизмов нарушения равновесия, так и особенностей спектроскопии излучения, поглощения и рассеяния [5].

Исторически спектральный газоанализ развивался на базе классических эмиссионных методов [6] и применяется для диагностики самосветящихся объектов, например, электрических дуг, индуктивно-связанной плазмы, искровых электрических и оптических пробоев для нужд заводских лабораторий в металлургии, изотопного анализа в геологии [7] и др. При этом, однако, практически полностью решая вопрос о неинвазивности и дистанционности анализа, эмиссионные методы, будучи селективными не только по сортам частиц, но и по их энергетическим состояниям, оставляют открытой проблему существования равновесия частиц с их же излучением. В такой (типичной) ситуации весьма сложно соотнести малые концентрации возбужденных и основной массы невозбужденных частиц с единой химической формулой и получаемые таким образом сведения о концентрациях оказываются косвенными. Их интерпретация нуждается в достаточно подробных исследованиях в каждом конкретном случае проведения анализа. По этой причине в аналитической практике эмиссионные методы применяются к светящимся газовым и плазменным объектам при атмосферном и более высоких давлениях в условиях, часто близких к равновесным, что также должно проверяться. В ИК области интерпретация интенсивностей часто осложняется проблемой реабсорбции собственного излучения. Эти вопросы до настоящего времени находятся в стадии рассмотрения. Основная мотивация к этому – простота реализации эмиссионных измерений, что иногда оказывается определяющим фактором (удаленные и изолированные объекты).

К более прямым и надежным в плане газоанализа можно отнести методы абсорбции и рассеяния, в которых информация получается о концентрациях частиц в основных (иногда метастабильных и резонансных) электронных состояниях. При таком преимуществе перед эмиссионными, эти методы имеют и свои специфические трудности.

Методы рассеяния, даже в современных, часто сложных в экспериментальном отношении, версиях с когерентными лазерными схемами [8] имеют ограничения в измерениях концентраций частиц малой плотности из-за малости сечений рассеяния по сравнению с характерными для дипольных переходов сечениями поглощения.

Далеко не все атомы и молекулы в основных электронных состояниях в газах имеют интенсивные линии и полосы поглощения на переходах между различными электронными состояниями в удобной для измерений области спектра от ближней УФ до ближней ИК. Исключение составляют щелочные атомы и простейшие молекулярные радикалы. Спектроскопия в ВУФ области сопряжена с вакуумированием оптических схем из-за поглощения в атмосфере и использованием специальных источников просвечивающего излучения. Среди классических это источники с излучением линий, резонансных линиям в структуре электронно-колебательных полос поглощения исследуемых частиц (атомно-абсорбционная спектроскопия [9] и синхротроны, среди лазерных - мощные источники для регистрации поглощения на многоквантовых переходах с малыми сечениями (см. библиографию в [8]). ИК область привлекательна для спектроскопии на колебательно-вращательных переходах, и для целей анализа молекулярных газов в равновесных условиях используются методы Фурье-спектроскопии [10], разработано большое число специализированных спектрометров [5]. Монохроматичность, высокая спектральная плотность мощности, направленность излучения лазеров позволили существенно повысить чувствительность измерений поглощения, в том числе, благодаря новым, по сравнению с классическими, схемам измерений. Помимо традиционной прямой регистрации изменения интенсивности прошедшего через объект света, разработаны схемы спектроскопии высокой чувствительности с регистрацией изменений параметров объектов, как реакции на поглощение. Среди этих методов спектроскопия лазерно-индуцированной флуоресценции, фотоакустическая спектроскопия, оптико-гальваническая спектроскопия и др. [11-15]. Надо заметить, однако, что чувствительность таких схем имеет свои ограничения, связанные с собственными шумами и неустойчивостями в объектах исследований.

Исходя из поставленной задачи об исследовании поведения молекул в неравновесном объекте, в настоящей работе мы используем, в том числе, версию прямых измерений поглощения - диодную лазерную спектроскопию (ДЛС). В ней в качестве источников света используются перестраиваемые диодные лазеры. Такая техника развивалась и успешно используется в газоанализе равновесных сред [1,2]. При этом, однако, как и для других упоминавшихся выше методов,

прямое перенесение этого опыта на область условий, в которых совокупность поглощающих частиц является подсистемой неравновесной среды, неправомерно, и должен быть учтен ряд новых и уточняющих факторов. При изучении изменений концентраций частиц часто необходимо проведение измерений концентраций с разрешением во времени. В условиях плазмы исходный плазмообразующий газ преобразуется в набор частиц с сильно различающимися концентрациями и вероятностями оптических переходов, поэтому динамический диапазон метода измерений поглощения должен быть достаточно большим. Для надежной интерпретации результатов измерений следует предусмотреть коррелированные изменения во времени концентраций нескольких частиц. Необходим контроль температуры нейтрального газа в условиях энерговыделения. Для обеспечения точности и надежности измерений следует учитывать влияние шумов плазмы и обеспечить их достаточную статистику, согласованную с необходимым быстродействием и т.д. Подобного рода вопросы лазерной абсорбционной спектроскопии начали изучаться лишь в последние годы, некоторые из них возникали впервые в процессе выполнения настоящей работы.

В настоящей работе методом ДЛС исследовалось поведение молекул воды и кислорода в смеси с инертными газами в газе и плазме пониженной плотности в условиях их взаимодействия со стенками разрядной камеры. Выбор объекта связан со следующими обстоятельствами:

- молекулы воды проявляют свойство сильной адгезии на поверхностях из различных материалов и традиционно являются одним из основных трудно устраняемых «загрязнителей» во многих типах вакуумных и электровакуумных установок [16, 17]. Молекулы кислорода в плазме являются их производными. В условиях газового разряда реакции в объеме плазмы и гетерогенные взаимодействия молекул с поверхностями протекают одновременно. Определение характерных времен их превращений имеют фундаментальный интерес и практический смысл;

- уже достаточно длительный опыт создания прототипов термоядерных реакторов выявил острую потребность в контроле содержания молекул воды вблизи внутренней поверхности первой стенки разрядной камеры. В этой зоне

плазма является низкотемпературной и неравновесной. Процедуры подготовки и тестирования стенки предусматривают испытания с применением вспомогательных разрядов. В новых проектах (в т.ч. строящегося реактора ИТЭР) это регламентируется специально [18]. Представлялось важным предложить прямые методы мониторинга концентраций этих молекул на установке, моделирующей такие условия;

- прямых количественных спектроскопических измерений концентраций молекул H_2O с развитым ИК спектром в неравновесных условиях в плазме ранее не проводилось. Двухатомные гомоядерные молекулы O_2 не имеют сильных колебательно-вращательных оптических переходов, регистрация поглощения затруднена, и представлялось интересным продемонстрировать возможности лазерного метода на слабых переходах и одновременных измерений для этой пары. Такие измерения дают основу для описания механизмов происходящих процессов в рамках моделей адсорбции и неравновесной плазмохимической кинетики.

Цель работы – установление взаимосвязей объемных и поверхностных процессов в газе и плазме пониженной плотности.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решались следующие **задачи**:

1. Создать экспериментальные модели объектов для изучения динамики поведения молекул воды в смесях с инертными и молекулярными добавками в состоянии газа и плазмы газового разряда в кварцевых трубках методами спектроскопии поглощения. Давления исходных газов ~10^{-1}-10 мбар.

2. Разработать диодный лазерный абсорбционный спектрометр от видимой до ближней ИК области с аналитическим внешним оптическим резонатором, содержащим исследуемые объекты. Адаптировать спектрометр для измерений концентраций молекул H_2O, HDO и O_2. Спектральное разрешение должно обеспечивать разрешение колебательно-вращательной структуры и регистрацию формы контуров спектральных линий. Отработать методики спектральных измерений концентраций и температур нейтральных частиц в неравновесных условиях. Апробировать прямой метод диодной лазерной

спектроскопии в качестве средства контроля косвенных эмиссионных количественных измерений малых концентраций молекул в плазме.

3. Определить механизмы и скорости процессов адсорбции/десорбции молекул на кварце.

4. Проанализировать индивидуальные и коррелированные изменения концентраций H_2O, HDO, O_2 в разряде, баланс элементов, влияние состояния поверхности кварца на объемный химический состав плазмы.

5. Разработать и использовать плазмохимическую модель кинетики тяжелых частиц и электронов для интерпретации экспериментальных результатов, выявить основные, включая гетерогенные, процессы формирования состава плазмы.

Научная новизна:

1. Создан экспериментальный комплекс для исследований изменений концентраций молекул во времени в неравновесных условиях в газе и плазме. Центральное звено измерительной части комплекса – оригинальный двухканальный диодный лазерный спектрометр с цифровым управлением. Используется схема с внешним резонатором и дихроичной оптикой с не аксиальным вводом лазерного излучения для индивидуальных и коррелированных измерений поглощения на колебательно-вращательных переходах молекул в видимой и ближней ИК областях. Для исследуемых условий спектральное разрешение $\sim 10^{-4}$ см$^{-1}$, скорость записи спектра до 10^5 см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, чувствительность $\sim 10^{12}$ см$^{-3}$ для концентрации молекул H_2O и HDO и $\sim 10^{15}$ см$^{-3}$ для O_2, разрешение по времени на пороге чувствительности ~1…20 с.

2. Для повышения чувствительности измерений концентраций камера исследуемого объекта используется в качестве аналитического оптического резонатора. Предложены новые приемы оптимизации такой схемы. Впервые отмечено, что при высоких скоростях перестройки лазерной частоты, в случае использования внешнего оптического резонатора, возникают искажения спектра поглощения, построена количественная модель искажений.

3. Предложен метод исследований взаимодействия молекул воды с поверхностью кварца, когда в условиях динамического равновесия число частиц в газовой фазе (в наших условиях $8\cdot 10^{15}$…10^{13} см$^{-3}$) сопоставимо или менее их

числа в одном монослое на поверхности. В согласии с результатами исследования динамики концентраций молекул в газовой фазе построена модель адсорбции, учитывающая физические (силы Ван-дер-Ваальса) и химические (межатомные связи) механизмы. Показано, что, хотя в условиях динамического равновесия частицы удерживаются на поверхности, в основном, химическими механизмами (плотность $\sim 10^{14}$ см$^{-2}$), физические механизмы (плотность$\sim 10^{3}$ см$^{-2}$) играют важную роль на начальных этапах адсорбции из-за высоких скоростей прямых и обратных реакций.

4. Впервые исследовано влияние разряда на активность стенок в процессах формирования химического состава газа в объеме. На примере молекул кислорода в смесях с инертными и молекулярными газами продемонстрировано, что после обработки поверхности разрядом скорости высвобождения и захвата O_2 центрами адсорбции на обработанной разрядом поверхности зависят от сорта частиц-партнеров. Процессы установления стационарной плотности O_2 в объеме разряда также происходят с различной скоростью и глубиной в смесях плазмообразующих газов с различными частицами-партнерами.

5. Впервые реализован одновременный мониторинг изотопомеров H_2O-HDO в одном канале ДЛС-спектрометра и пары H_2O-O_2 в двух его каналах. Изучено установление динамического равновесия концентраций этих молекул в разряде.

6. Применительно к условиям измерений адаптирована плазмохимическая модель неравновесных объемных и гетерогенных процессов в тлеющем разряде в плазмообразующих газах, содержащих молекулы воды и кислорода. Результаты моделирования согласуются с результатами измерений концентраций молекул. Показано, что стартовый процесс распада молекул в плазме инициируется электронами. В исследуемой области пониженных давлений и геометрии разряда последующие взаимодействия их фрагментов между собой, включая рекомбинацию молекул, атомов, радикалов, электронов и ионов происходят преимущественно на стенках, ограничивающих плазму. Для объяснения нарушения баланса элементов введена реакция взаимодействия атомов кислорода в газовой фазе и молекул воды на поверхностных центрах адсорбции.

Теоретическая и практическая значимость:

Показанные новые возможности и схемы количественной лазерной абсорбционной спектроскопии молекул в неравновесных гетерогенных системах в теоретическом плане представляют интерес для фундаментальных исследований в области аналитической спектроскопии и физико-химической кинетики. В практическом плане наблюдаемое в настоящее время развитие технологий создания широкого класса частотно-перестраиваемых полупроводниковых лазеров делает предложенные пилотные методы перспективными для мониторинга широкого круга процессов в объектах промышленной химии, энергетики, транспорта, биологии и медицины.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная спектральная техника обеспечивает одновременные измерения концентраций молекул H_2O и O_2 и их температур, что позволяет эффективно исследовать объемные и гетерогенные процессы в газе и плазме при сопоставимых количествах свободных ($\sim 10^{13}$-10^{16} $см^{-3}$) и захваченных на поверхности ($\sim 10^{14}$-10^{15} $см^{-2}$) молекул.

2. При ширинах линий поглощения $\sim 10^{-2}$ $см^{-1}$ искажения их контуров связаны с конечным временем жизни фотона в резонаторе, при добротности $\sim 10^4$ искажения проявляются при скоростях сканирования частоты более 10^2 $см^{-1} \cdot с^{-1}$.

3. Начальная стадия адсорбции с характерным временем ~1 с и быстрый обмен частицами между поверхностью и объемом определяется ван-дер-ваальсовским взаимодействием, а стационарное количество адсорбированных молекул – образованием их химических связей с поверхностью с плотностью $(2\text{-}7) \cdot 10^{14}$ $см^{-2}$. Характерное время спонтанного выхода адсорбированной молекулы в вакуум t=33±3 с. Химических превращений молекул воды в процессах адсорбции-десорбции не происходит.

4. Воздействие разряда в смеси газов, содержащих кислород, на кварцевую стенку реактора изменяет ее адсорбционные и эмиссионные характеристики. Эмиссия может происходить при взаимодействии центров адсорбции с нейтральными атомами и молекулами.

5. Нарушение баланса частиц в разряде в газах, содержащих молекулы воды и кислорода, связано с адсорбцией молекул воды стенками реактора на стадии его

заполнения. Эмиссия свободных молекул H_2 и O_2 происходит при включении разряда в результате гетерогенной реакции, $H_2O_{wall} + O \rightarrow H_2 + O_2$, при тепловых столкновениях нарабатываемых в плазме атомов кислорода с центрами адсорбции H_2O на поверхности реактора с вероятностью $\sim 10^{-6}$.

Степень достоверности

При создании экспериментальной установки использованы современное измерительное оборудование и элементная база, библиотеки программ численных алгоритмов цифрового управления и автоматизации. Новые предложения и их разработки опирались на признанные в научном сообществе результаты предшествующих исследований и, развивая их, не входили с ними в противоречие. Моделирование экспериментальных результатов учитывало результаты современных достижений в области программирования схем решения большого числа кинетических уравнений. Теоретические результаты соответствовали результатам измерений и были воспроизводимы. Результаты работы были апробированы на большом числе всероссийских и международных конференций, опубликованы в научных изданиях.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертационной работе получены автором лично или при его непосредственном участии.

Апробация результатов работы и публикации.

Результаты диссертационной работы доложены на 16 российских и международных конференциях:

- XXIV международная конференция "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2016", Новороссийск, Россия.
- XXV Съезд по спектроскопии. 2016, Москва, Россия.
- 3rd International Summer School on the Physics of Plasma-Surface Interactions. 2018, Mocsow, Russia.
- XI, XII Конференции "Современные средства диагностики плазмы и их применение". 2018, 2020, Москва, Россия.
- II международная конференция «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии». 2019, Москва, Россия.

− Школа молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» 2019, 2021, 2022, 2023, Москва, Россия.

− IX Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики". 2020, Минск, Беларусь.

− VII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2021», Москва, Россия.

− II Международная конференция "Газоразрядная плазма и синтез наноструктур" (GDP-NANO2021) 2021, Москва, Россия.

− Международный молодежный научный форум «ЛОМОНОСОВ-2021» 2021, Москва, Россия.

− «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». 2021, 2022, Moscow, Russia.

Основные результаты диссертации опубликованы в 14 статьях в научных журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus, а также в 16 публикациях в материалах научных конференций. Список публикаций приведен на с. 24-28 автореферата.

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

Работа выполнялась в рамках планов ФИАН (госзадание) и поддерживалась грантами: Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-02-00540), Российского научного фонда (гранты № 14-12-00784, 19-12-00310).

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены цель работы и личный вклад автора, дан анализ научной новизны полученных результатов и их практической значимости, приведены основные результаты, положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации.

В **первой главе** описываются особенности экспериментальной техники и методологии измерений. В ее основе лежит разработанный в рамках диссертации новый тип двухканального диодного лазерного спектрометра, позволяющего изучать динамику концентраций двух связанных взаимными превращениями частиц в плазме газового разряда с сильно отличающимися частотами

поглощения. В нем используются два диодных лазера и единый внешний оптический резонатор с неосевой юстировкой для повышения спектрального разрешения и дихроичной оптикой, разрядная трубка с зеркалами на концах служит одновременно резонатором (рис. 1).

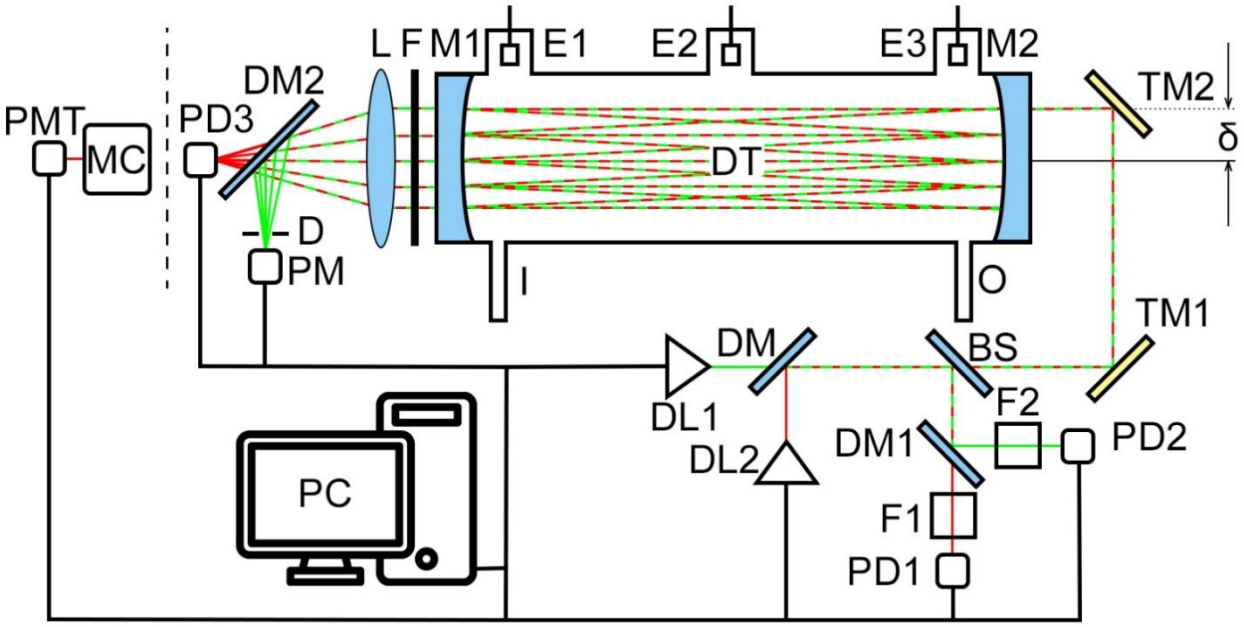

Рис. 1. Оптическая схема спектрометра. DT – кварцевая трубка реактора с функциями оптического резонатора и разрядной камеры; M1, M2 – дихроичные зеркала; E1, E2, E3 – электроды; I, O – каналы напуска и откачки газов; DL1, DL2 – диодные лазеры; DM – дихроичное зеркало; BS – делительная пластина; DM1, DM2 – узкополосные зеркала для пространственного разделения оптического излучения двух лазеров; F1, F2 – эталоны Фабри-Перо; TM1, TM2 – поворотные зеркала; F – фильтр; L –линза; D – диафрагма; PD1, PD2, PD3 – фотодиодные детекторы; PM – ФЭУ; PC – компьютер со входным интерфейсом для управления режимами работы лазеров и сбора данных с детекторов в измерительных и калибровочных каналах. Ход лучей обозначен штрихами разного цвета. Для эмиссионных измерений на месте детектора PD3 располагалась входная щель монохроматора MC, сигнал с монохроматора принимался на ФЭУ PMT.

Основные характеристики – скорости перестройки частот обоих лазеров до 10^5 см$^{-1}$·с$^{-1}$, спектральное разрешение 10^{-4} см$^{-1}$, чувствительность по поглощению ~10^{-7} см$^{-1}$. Управление спектрометром и сбор данных цифровые, автоматизированные. Описывается методология расчета концентраций по измеренному поглощению.

Описываются структура и свойства разрядного устройства, системы напуска и откачки газов, питания тлеющего разряда постоянного тока, конструкция и характеристики вспомогательного спектрального канала для

эмиссионной диагностики тлеющего разряда. Результаты, описанные в данной главе, опубликованы в работах [А2, А9, А11, А14].

Вторая глава посвящена явлению искажения контуров линий поглощения, возникающих при быстрой перестройке частоты в системах с высокодобротным внешним резонатором. Для достижения приемлемой точности измерений и чувствительности к поглощению на уровне $\sim 10^{-5}$ см$^{-1}$ для объектов геометрической протяженностью ~1 м и разрешением во времени ~1 с требуется статистическая обработка $\sim 10^{3}$ спектров поглощения с разрешением $\sim 10^{-2}$ см$^{-1}$ в диапазоне волновых чисел $\Delta\nu$ ~1 см$^{-1}$ вблизи контура аналитической линии, что соответствует скоростям перестройки частоты $\mu \sim 10^{3}$ см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$. В процессе экспериментальной работы было обнаружено, что форма контура линии поглощения в резонаторе заметно искажается уже при скоростях существенно (на 2-3 порядка величины) более медленных, чем это можно было бы ожидать, исходя из опыта известных исследований нестационарных когерентных взаимодействий [15].

Для условий экспериментов в рамках диссертации была разработана физическая модель, описывающая наблюдаемый эффект искажения формы контура линии в резонаторе. В рамках этой модели наблюдаемые спектры следует трактовать как свертки истинного статического спектра с аппаратной функцией внешнего резонатора. Механизм аппаратных искажений связан с конечностью времени жизни фотонов в резонаторе. По сравнению с обычно используемым понятием аппаратной функции, относящимся к классическому спектральному прибору, отличие состоит в том, что эта функция становится зависящей от времени записи спектра. Результаты сравнения эксперимента и расчета приведены на рис. 2. Важно отметить, что при искажениях спектра величина интегрального поглощения сохраняется. Результаты, описанные в данной главе, опубликованы в работах [А9, А10, А12, А13].

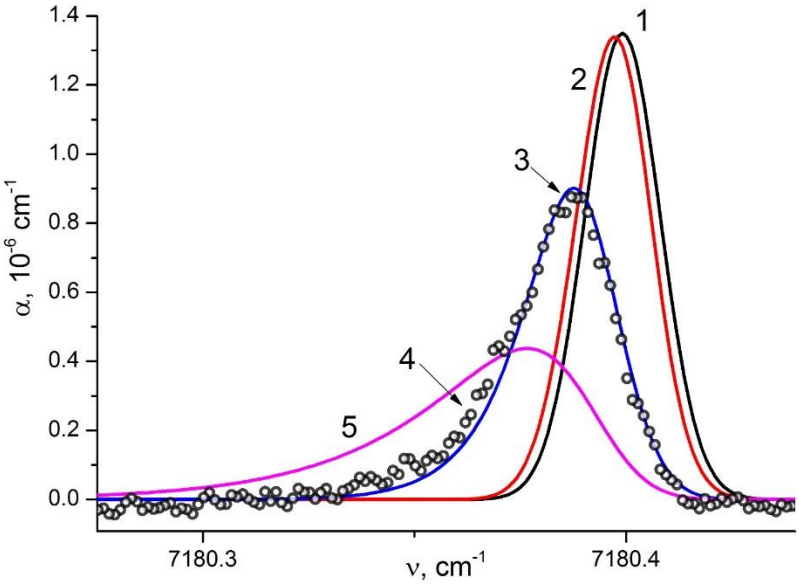

Рис. 2. Контуры линии поглощения воды P(4) (000-200) для различных скоростей перестройки частоты. 1 – Доплеровский контур, 2 – $\mu = 100$ см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, 3, 4 – $\mu = 800$ см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$, 5 – $\mu = 2\cdot10^3$ см$^{-1}\cdot$с$^{-1}$. Отражение зеркал R = 99.98%, давление паров воды p = 0.045 мбар. Сплошные линии – расчет, маркеры – эксперимент.

В **третьей главе** описываются закономерности падения объемной плотности молекул воды в газовой фазе со временем после окончания напуска и ее рост после откачки в результате адсорбции и десорбции частиц поверхностью кварца. Неэкспоненциальный вид зависимостей (рис. 3) говорит о нескольких одновременно протекающих процессах с разными характерными временами. Была построена кинетическая модель, учитывающая параллельные конкурирующие процессы адсорбции и десорбции по физическому и химическому механизмам. Сравнение результатов эксперимента и расчета по разработанной модели показано на рис. 3.

Исследован переход системы свободные – адсорбированные молекулы к стационарному состоянию газ-поверхность, описываемому известными равновесными изотермами. Для выявления особенностей перехода исследования проводились в условиях, когда полное число молекул в исходном свободном газе сопоставимо с их числом в одном поверхностном монослое. Показано, что наблюдаемые зависимости удовлетворительно описываются совокупностью степенных функций с показателями, соответствующими нескольким одновременным процессам.

Выявление таких закономерностей оказалось возможным при пониженном давлении, когда количество частиц, адсорбированных на стенке, сопоставимо с количеством частиц в объеме камеры. Такая возможность обеспечивалась с

помощью разработанного лазерного спектрометра с высокой чувствительностью и быстродействием.

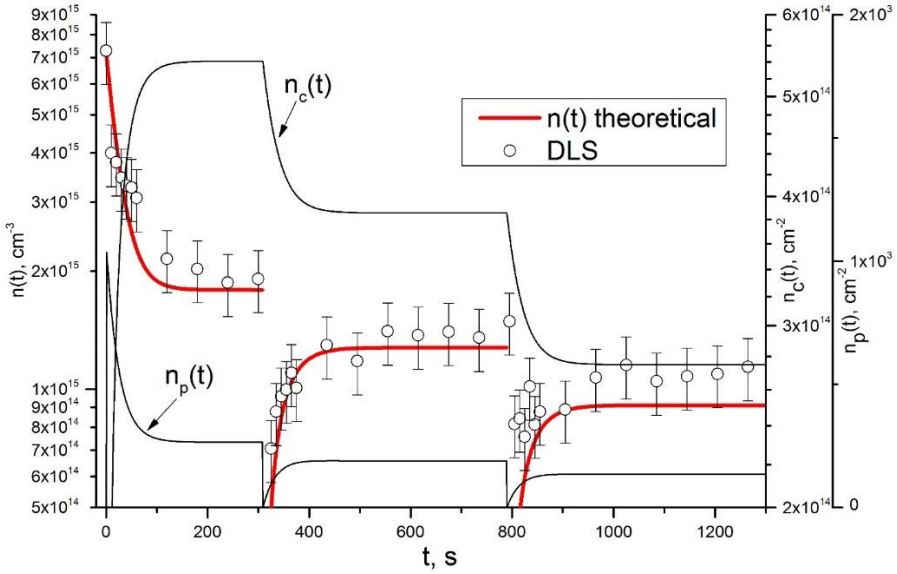

Рис. 3. Динамика концентрации n частиц в газовой фазе и их поверхностной плотности в слоях с физической n_p и химической n_C адсорбцией. Символы – измерения в газовой фазе методом ДЛС. Сплошные кривые – расчет.

Было обнаружено, что баланс полного числа частиц (в газовой фазе, слоях и откачанных из трубки) сохраняется с точностью до (4-5)%. Это свидетельствует, в частности, и о том, что, независимо от механизма разрушения связи адсорбат-адсорбент для молекулы воды на кварце (столкновения, туннелирование, фононные взаимодействия), он не сопровождается химическими превращениями. Результаты, описанные в данной главе, опубликованы в работе [А7].

Четвертая глава посвящена исследованию гетерогенных взаимодействий молекул кислорода, менее адгезивных, чем вода, в нормальных условиях. Диссоциация молекул кислорода в разряде приводит к наработке химически активных атомов кислорода. Поэтому интересны особенности поведения частиц, взаимодействующих с поверхностью при неравновесных условиях в объеме. С другой стороны, также интересно выяснить, например, влияет ли, и каким образом, предварительная активация поверхности на способность к взаимодействию с ней свободных частиц как в нейтральном газе, так и в плазме разряда. Автору не известно, чтобы это делалось ранее.

Измерения проводились в смесях кислорода с различными газами при общем давлении (0.5 – 5) мбар. При измерениях в разряде его ток менялся от 4 мА до 8 мА. При работе с кислородом без других добавок выяснилось, что при проведении последовательностей экспериментов результаты измерений

концентраций молекул зависят от процедуры подготовки трубки в период между ними. Поэтому для основной массы экспериментов проводилась единообразная предварительная активация стенки трубки разрядом в смеси O_2+He в течение 10 мин с последующей откачкой в течение 10 минут для очистки объема с сохранением активации центров адсорбции. Далее напускалась основная смесь O_2+He и к ней добавлялись различные инертные или молекулярные газы. Некоторые результаты подобных экспериментов показаны на рис. 4.

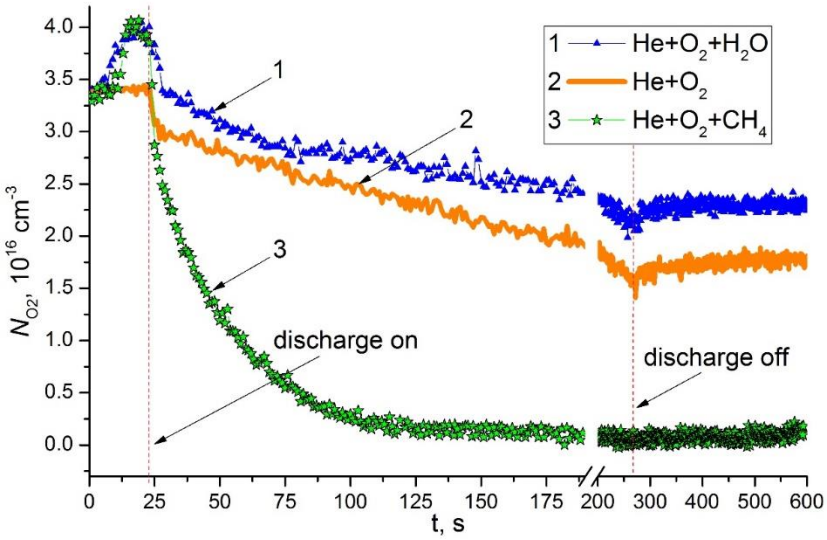

Рис. 4. Динамика концентрации O_2 с добавлением молекулярных газов и без добавок.

Показано, что активация внутренней поверхности кварцевой газоразрядной трубки предварительным разрядом влияет на динамику поведения плотности молекул кислорода в объеме. Десорбция кислорода со стенки происходит либо при вакуумировании с характерными временами ~10 часов, либо при взаимодействии с центрами адсорбции невозбужденных атомов и молекул, дополнительно введенных в объем разряда. Динамика разложения молекул кислорода на стадии разряда зависит от способа подготовки трубки, в частности, от типа частиц, добавляемых в плазмообразующий газ для дезактивации центров адсорбции. По результатам экспериментов делается вывод, что взаимодействие плазмы с поверхностью меняет ее адсорбционные свойства. На примере газа и плазмы разряда в кислороде показано, что активированная поверхность способна восстанавливать молекулы кислорода в газовой фазе из адсорбированных атомов в отсутствие разряда при взаимодействии с некоторыми молекулами и тяжелыми инертными газами. Эта активность различна в отношении свободных частиц-партнеров различного сорта.

Результаты данной главы опубликованы в работе [А11].

В **пятой главе** обсуждаются коррелированные изменения концентраций молекул воды и кислорода в полном разрядном цикле по спектрам поглощения. В плазме вода и кислород всегда сосуществуют, даже если исходный газ молекул кислорода не содержит, поскольку в силу цепочек плазмохимических электрон-молекулярных процессов молекулярный кислород становится производным от воды. При низком давлении и ограниченном объеме большую роль играют реакции на стенке. Для выявления влияния поверхности на взаимные превращения этих молекул впервые исследовалась динамика их коррелированного поведения непосредственно в разряде.

Использовались параллельно два канала спектрометра. С учетом возможных эффектов искажения контуров спектральных линий скорость перестройки частоты генерации диодных лазеров была согласована и составляла ~10^2 $см^{-1} \cdot с^{-1}$. При параллельных измерениях концентраций их чувствительность ограничивалась, в основном, влиянием собственного излучения разряда на работу ФЭУ в канале детектирования кислорода и составляла $5 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$ в разряде и 10^{15} $см^{-3}$ в его отсутствие.

На подготовительной стадии каждого цикла измерений в откачанной трубке осуществлялся разряд в смеси 0.5 мбар He + 0.1 мбар H_2O + 1 мбар O_2 в течение 10 минут с последующей откачкой до 10^{-4} мбар.

На рис. 5 показана динамика изменений концентраций молекул воды (а) и кислорода (б) в разрядной трубке на этапах заполнения вакуумной системы (0-30) с, горения разряда при токе 35 мА (30-150) с и после его выключения (150-210) с в плазмообразующей смеси He+H_2O с различными добавками кислорода. Моменты включения и выключения разряда отмечены вертикальными штриховыми линиями. На рис. 5а – при отсутствии добавленного кислорода вода в разряде распадается, однако, в присутствии кислорода, в процессе разряда нарабатываются молекулы воды в количествах, превышающих исходные, хотя в начальные моменты после включения разряда происходит их убыль. То есть нарушается баланс частиц по водороду.

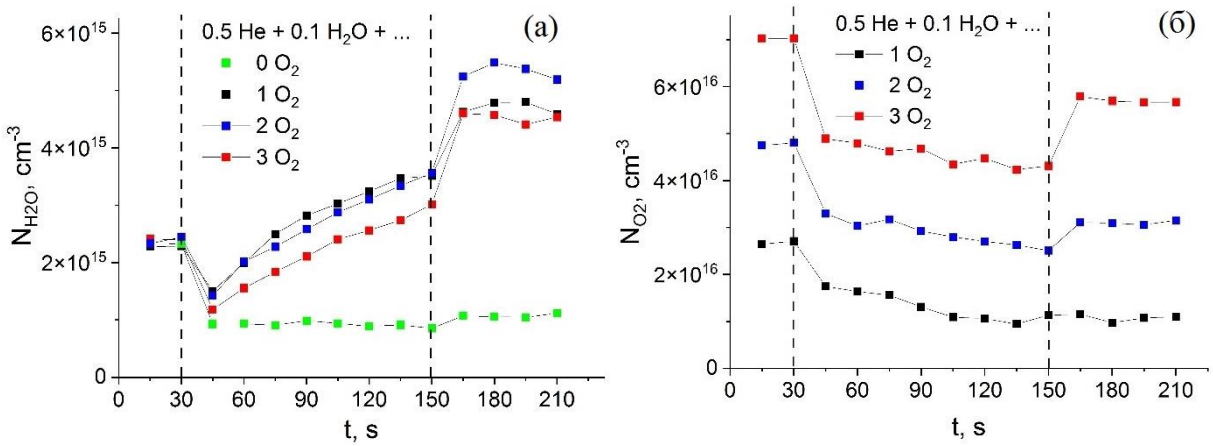

Рис. 5. Динамика концентраций молекул H_2O(а) и O_2(б) в разрядном цикле. Плазмообразующая смесь 0.5 мбар He + 0.1 мбар H_2O + x мбар O_2, x=0, 1, 2, 3.

Интерпретация наблюдаемой динамики концентраций молекул проводилась на базе разработанной 0D модели кинетики плазмохимических процессов. В модель были включены 245 кинетических уравнений реакций с участием электронов, молекул в основных и возбужденных электронных и колебательных состояниях, атомов и ионов. Совместно с ними решалось локальное уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергии. Включены реакции на стенке и в объеме трубки. Нагрев газа учитывается с помощью уравнения теплопроводности, также в модель было включено уравнение внешней электрической цепи. Для объяснения нарушения элементного баланса частиц по водороду введена ранее не изучавшаяся реакция свободных атомов кислорода в разряде с адсорбированными поверхностью в процессе напуска плазмообразующих газов молекулами воды. В результате этой реакции в плазму поступают свободные молекулы водорода и кислорода. Кинетика в целом и эффекты дисбаланса хорошо описываются при вероятности протекания этой реакции на одно взаимодействие атома с центром адсорбции $\gamma = 2 \cdot 10^{-6}$.

Результаты данной главы опубликованы в работе [A14].

Шестая глава посвящена поведению изотопического соотношения H_2O /HDO в разряде в разных исходных газах. В силу специфики плазмы ядерных реакторов в них вблизи первой стенки возможно образование изотопомеров молекул воды. Поэтому представляло интерес апробировать метод в целях исследования поведения концентраций воды и полутяжелой воды в разряде. Анализ спектров показал, что для таких исследований можно путем подбора различных колебательно-вращательных переходов с близкими частотами использовать один канал спектрометра вблизи 1.3 мкм (аналогичным образом

исследуются спин-изомеры воды [16]). В качестве плазмообразующих использовались смеси гелия с фиксированной концентрацией $n^0_{He}=8.5\cdot10^{15}$ см$^{-3}$ и переменными концентрациями молекул воды и дейтерия n^0_{H2O} и n^0_{D2}.

Измерения показали, что при фиксированных концентрациях n^0_{H2O} или n^0_{D2} содержание молекул n_{H2O} и n_{HDO} в разряде варьируется и зависит от времени действия разряда. При этом оказывается, однако, что соотношение концентраций изотопомеров в разряде сохраняется. Это показано на рис. 5. Видно, что во всех случаях отношение концентраций $k=n_{H2O}/n_{HDO}=3\pm0.5$.

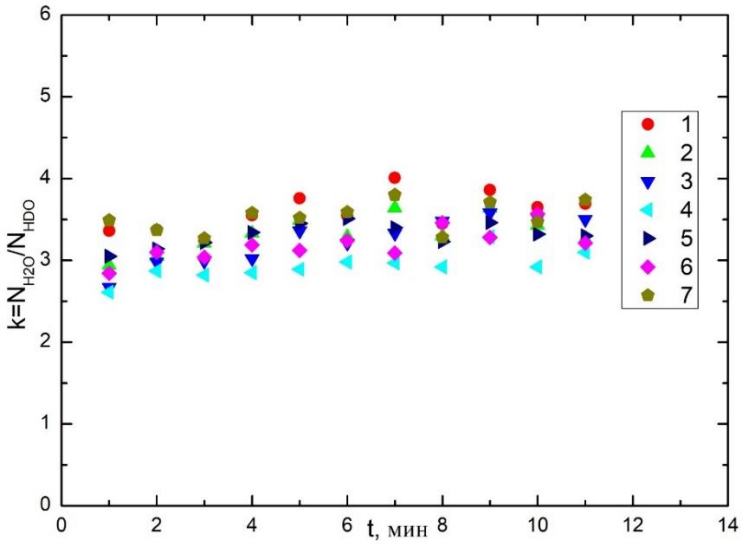

Рис. 5. Поведение отношения измеренных в разряде концентраций молекул H_2O и HDO в смеси гелия $n^0_{He}=8.5\cdot10^{15}$ см$^{-3}$ с молекулами H_2O и D_2 при их разных начальных концентрациях:

1 – $n^0_{H2O}=4.8\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=1.8\cdot10^{15}$ cm^{-3}; *2* – $n^0_{H2O}=8.4\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=1.8\cdot10^{15}$ cm^{-3};

3 – $n^0_{H2O}=9.6\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=1.8\cdot10^{15}$ cm^{-3}; *4* – $n^0_{H2O}=4.4\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=3.6\cdot10^{15}$ cm^{-3};

5 – $n^0_{H2O}=8.8\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=3.6\cdot10^{15}$ cm^{-3}; *6* – $n^0_{H2O}=6.0\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=5.3\cdot10^{15}$ cm^{-3};

7 – $n^0_{H2O}=8.4\cdot10^{14}$ cm^{-3}, $n^0_{D2}=5.3\cdot10^{15}$ cm^{-3}.

Оценки показывают, что в условиях описанного эксперимента адсорбированный слой обоих изотопомеров воды соответствует около 0.2 монослоя заполнения поверхности, это почти на порядок меньше того, что наблюдалось в экспериментах, описанных в главе 3, с парами обычной воды без разряда. По-видимому, это связано с увеличением скорости десорбции молекул с поверхности, взаимодействующей с плазмой.

В целях контроля возможности количественных измерений известным из литературы косвенным методом собственной эмиссии плазмы [17] определялись интенсивности свечения т.н. "горячей" группы во вращательной структуре электронной полосы $A^2\Sigma–X^2\Pi$ гидроксила OH. Они появляются в результате

диссоциативного возбуждения молекул H_2O электронным ударом с последующим их распадом на атом H и возбужденный гидроксил $OH(A^2\Sigma)$.

В качестве частицы актинометра был выбран Xe (спектральная линия 823.2 нм) с порогом возбуждения близким к порогу возбуждения спектра «горячего» гидроксила. Результаты косвенных актинометрических измерений были сопоставлены с результатами прямых измерений методом диодной лазерной спектроскопии. Оказалось, что результаты измерений разными методами в данном конкретном случае хорошо согласуются. Таким образом, использование прямого абсорбционного метода может быть полезно также и как средство контроля справедливости (или некорректности) косвенных измерений. Результаты данной главы опубликованы в работах [A2-A6, A8].

В **заключении** приведены основные результаты работы.

В **приложении 1** предложен новый метод оптимизации условий измерений поглощения среды в резонаторе при использовании зеркал с отличающимися коэффициентами отражения (т.н. несимметричный резонатор).

На примере измерения концентрации метана в атмосфере показано, что при использовании зеркал с разными коэффициентами отражения возможно увеличение соотношения сигнал/шум. Однако использование описанного метода оптимизации в многоканальных схемах с несколькими источниками и приемниками не представляется целесообразным, так как требует использования дополнительной многополосной оптики и приемников в каждом измерительном канале для регистрации отраженного сигнала, что существенно увеличивает сложность и стоимость подобных установок, поэтому данная оптимизация не нашла применения в основной массе экспериментальной работы в рамках диссертации. Результаты, полученные в рамках приложения 1, опубликованы в работе [A1].

Приложение 2 содержит в себе полный комплект реакций и констант их скоростей. Все эти реакции были включены в однородную плазмохимическую модель, описанную в главе 5.

Заключение

В соответствии с поставленными задачами были выполнены исследования, в процессе которых получены новые результаты:

1. Исследована динамика неравновесных объемных и гетерогенных процессов с участием молекул воды и кислорода в газе и газоразрядной плазме при давлениях ~1 мбар. Для одновременного мониторинга температуры и концентраций молекул разработан оригинальный абсорбционный диодный лазерный спектрометр с внешним резонатором и дихроичной оптикой, разрешением ~10^{-4} $см^{-1}$, чувствительностью 10^{-7} $см^{-1}$ в полосах поглощения 760 нм и 1392 нм, скоростью записи спектров до 10^5 $см^{-1}{\cdot}с^{-1}$.

2. Для корректных измерений температуры газа по допплеровскому уширению в условиях искажений контура поглощения при быстрой записи спектра создана модель искажений, разработан алгоритм оптимизации режимов записи и чувствительности в диапазоне скоростей (10-10^4) $см^{-1}{\cdot}с^{-1}$.

3. Исследованы процессы адсорбции и десорбции паров воды поверхностью кварца при комнатной температуре, построена кинетическая модель, описывающая результаты измерений. Показано, что общая динамика процессов может быть описана двумя механизмами с характерными временами ~1 с и ~33 с. Стационарная поверхностная плотность адсорбированных молекул (2-7)·10^{14} $см^{-2}$ близка к плотности их монослоя с фактором шероховатости поверхности F=50.

4. Установлено, что в разряде в смесях, содержащих кислород, происходит его адсорбция, а при последующем заполнении реактора в отсутствие разряда инертными (Ne, Xe) или молекулярными (H_2O, CH_4) газами – эмиссия в объемную фазу. После обработки стенок разрядом в смеси He-O_2 (3:7, 2 мбар) выделение O_2 происходит с характерными временами (1-10) с, их стационарная концентрация составляет 5·10^{15} $см^{-3}$.

5. Измерения концентраций частиц в разрядах в смесях He-O_2-H_2O с различным соотношением компонент показывают нарушение баланса молекул H_2O и O_2 как в плазме разряда, так и в его послесвечении. Для объяснения дисбаланса построена детальная плазмохимическая модель таких разрядов и показано, что это требует выявления дополнительного источника H_2, обеспечивающего плотность потока ~6·10^{13} молекул·$с^{-1}$·$см^{-3}$ при включении разряда.

6. При исследованиях процессов преобразования изотопомеров воды в разряде в смесях газов He-H_2O-D_2 при давлениях (0.7-1.3 мбар) обнаружено, что при избыточных по отношению к H_2O количествах D_2 время установления соотношения H_2O и HDO ~5 с. Величина этого отношения не зависит от конкретных пропорций воды и дейтерия $[H_2O]/[HDO] = 3.2 \pm 0.3$.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus

A1. Короленко, П. В., **Лагунов, В. В.,** Николаев, И. В., Очкин, В. Н., Цхай, С. Н., Яцкевич, А. Н. Оптимизация параметров внешнего резонатора лазерного спектрометра слабого поглощения // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – № 3. – С. 255–258. – DOI: 10.1070/QEL15892.

A2. Bernatskiy, A. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N., Tskhai, S. N. Study of water molecule decomposition in plasma by diode laser spectroscopy and optical actinometry methods // Laser Physics Letters. – 2016. – V. 13. – No. 7. – P. 075702. – DOI: 10.1088/1612-2011/13/7/075702.

A3. **Lagunov, V. V.,** Nikolaev, I. V., Ochkin, V. N., Tskhai, S. N. Measurement of the concentration of water vapor in a glow discharge plasma // Journal of Optical Technology. – 2017. – V. 84. – No. 6. – P. 415–418. – DOI: 10.1364/JOT.84.000415.

A4. Bernatskiy, A. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Measurement of the concentration of isotopes of water molecules in a discharge in an inert gas with the addition of H_2O and D_2 vapours by external-cavity diode laser spectroscopy // Quantum Electronics. – 2019. – V. 49. – No. 2. – P. 157–161. – DOI: 10.1070/QEL16819.

A5. Bernatskiy, A. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Investigation of the concentration dynamics of H_2O and HDO molecules in a discharge // Physics of Atomic Nuclei. – 2019. – V. 82. – No. 10. – DOI: 10.1134/S1063778819100065.

A6. Bernatskiy, A. V., Kochetov, I. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Isotopes of water molecules in a glow discharge in mixtures of helium with H2O and D2 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1370. – P. 012012. – DOI: 10.1088/1742-6596/1370/1/012012.

A7. Bernatskiy, A. V., Kochetov, I. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Electric fields and concentrations of charged and neutral hydrogen isotopic particles in the plasma of low pressure DC discharge // Physics of Plasmas. – 2019. – V. 26. – No. 8. – P. 083511. – DOI: 10.1063/1.5118830.

A8. Bernatskiy, A. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Investigation of the interaction of water molecules with the surface of a quartz tube using laser spectroscopy // Physics of Wave Phenomena. – 2019. – V. 27. – No. 3. – P. 165–177. – DOI: 10.3103/S1541308X19030014.

A9. **Lagunov, V. V.,** Nikolaev, I. V., Ochkin, V. N. High-resolution and high-sensitivity absorption spectroscopy in external optical resonators with fast frequency tuning // Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2021. – V. 246. – P. 119060. – DOI: 10.1016/j.saa.2020.119060.

A10. **Lagunov, V. V.,** Nikolaev, I. V., Ochkin, V. N. Effect of the Frequency Tuning Rate of a Diode Laser on the Shape of an Absorption Line Profile During Measurement of Low Concentrations in an External Cavity With Off-Axis Radiation Input // Journal of Applied Spectroscopy. – 2021. – V. 88. – № 3. – P. 496–500. – DOI: 10.1007/s10812-021-01199-z.

A11. Ochkin, V. N., **Lagunov, V. V.,** Bernatskiy, A. V. Influence of the surface state on the dynamics of the bulk density of O_2 molecules in mixtures with inert and molecular particles in gas and glow discharge // Applied Physics B. – 2022. – V. 128. – No. 4. – P. 75. – DOI: 10.1007/s00340-022-07800-3.

A12. Volkova, A. I., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Particle Concentration Measurements during Fast Recording of Absorption Spectra // Physics of Wave Phenomena. – 2023. – V. 31. – № 1. – P. 1–14. – DOI: 10.3103/S1541308X23010089.

A13. Volkova, A. I., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Manifestations of the Dicke Narrowing at Fast Recording of High-Resolution Absorption Spectra Using Frequency-Tunable Lasers // Physics of Wave Phenomena. – 2023. – V. 31. – № 5. – P. 312–319. – DOI: 10.3103/S1541308X23050060.

A14. Bernatskiy, A. V., Kochetov, I. V., **Lagunov, V. V.,** Ochkin, V. N. Parallel monitoring of the dynamics of oxygen and water molecule concentrations under the action of a glow discharge using diode laser spectroscopy // Physics of Wave Phenomena. – 2024. – V. 32. – № 6. – P. 410–422. DOI: 10.3103/S1541308X24700419.

Публикации в сборниках трудов международных и всероссийских конференций

Т1. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Измерение концентрации водяных паров в тлеющем разряде методами диодной лазерной спектроскопии и оптической актинометрии // Труды XXIV Международной

Конференции "Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте – 2016". – Новороссийск: Изд-во ГМУ, 2016. – С. 174.

Т2. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Николаев, И. В., Цхай, С. Н. Измерение концентрации водяных паров в тлеющем разряде методами диодной лазерной спектроскопии и оптической актинометрии // XXV Съезд по спектроскопии: Сборник тезисов. – М.: МПГУ, 2016. – С. 195–196.

Т3. Bernatskiy, A. V., Lagunov, V. V., Ochkin, V. N. H_2O and HDO molecule dynamics in quartz tube in discharge and after its shutdown // The book of abstracts of the 3rd International Summer School on the Physics of Plasma-Surface Interactions. – M.: NRNU MEPhI, 2018. – P. 8.

Т4. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Измерение концентраций H_2O и HDO в разряде методом диодной лазерной спектроскопии с внешним резонатором // Современные средства диагностики плазмы и их применение: Сборник тезисов докладов XI Конференции. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 9–12.

Т5. Бернацкий, А. В., Кочетов, И. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Изотопы молекул воды в тлеющем разряде в смесях гелия с H_2O и D_2 // Сборник трудов II международной конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии». – М.: МЭИ, 2019. – С. 70.

Т6. Бернацкий, А. В., Кочетов, И. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Исследование плазменного состава в смесях He+H2O+D2 // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике». – М., 2019. – С. 37–40.

Т7. **Лагунов, В. В.**, Николаев, И. В., Очкин, В. Н. Влияние скорости перестройки частоты на спектр слабого поглощения частиц во внешнем резонаторе с не осевым вводом лазерного излучения // Сборник тезисов IX Международной школы-конференции молодых ученых и специалистов "Современные проблемы физики". – Минск: Институт физики НАН Беларуси, 2020. – С. 73–74.

Т8. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Исследование диссоциации молекул кислорода в плазме тлеющего разряда методом диодной лазерной спектроскопии // Современные средства диагностики плазмы и их

применение: Сборник тезисов докладов XII Конференции. – М.: НИЯУ МИФИ, 2020. – С. 63–66.

Т9. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Динамика плотности молекул O_2 в тлеющем разряде // Сборник тезисов VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз 2021». – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 239–240.

Т10. Бернацкий, А. В., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Динамика концентрации молекулярного кислорода в трубке тлеющего разряда в смесях газов // Сборник тезисов II Международной конференции "Газоразрядная плазма и синтез наноструктур" (GDP-NANO2021). – 2021. – С. 69–72.

Т11. Волкова, А. И., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Влияние скорости перестройки частоты диодного лазера на форму линии поглощения молекулярного кислорода при абсорбционной спектроскопии во внешнем резонаторе // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2021. – М.: Типография "11-й ФОРМАТ", 2021. – С. 113–116.

Т12. **Лагунов, В. В.**, Николаев, И. В., Очкин, В. Н. Анализ искажения контура линии поглощения при изменении скорости перестройки частоты лазера с высокодобротным внешним резонатором // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2021». – М.: МАКС Пресс, 2021. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM). – подсекция “Оптика”, доклад 7; https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2021/data/section_34_22388_doc_name.htm.

Т13. **Lagunov, V.,** Ochkin, V., Volkova, A. Determination of particle concentrations from absorption spectra with fast frequency tuning // Сборник трудов 22 конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». – М.: Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН», 2022. – С. 192–192.

Т14. Волкова, А. И., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Количественные оптические методы при быстрой регистрации спектров поглощения // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2022. – М.: Типография "11-й ФОРМАТ", 2022. – С. 21–25.

Т15. **Lagunov, V. V.**, Ochkin, V. N., Volkova, A. I. Fast sensitive laser absorption spectroscopy // Сборник трудов 23 конференции «International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT)». – М.: Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН», 2023. – С. 188–188.

Т16. Волкова, А. И., **Лагунов, В. В.**, Очкин, В. Н. Исследование влияния эффекта Дике на нестационарный спектр поглощения // Тезисы докладов школы молодых ученых «Быстропротекающие электровзрывные, электронные и электромагнитные процессы в импульсной электронике и оптоэлектронике» БПИО-2023. – М.: Типография "ИП Попов Д.В.", 2023. – С. 23–26.

Список литературы, цитируемой в автореферате

1. Fiddler, M. N., Begashaw, I., Mickens, M. A., Collingwood, M. S., Assefa, Z., Bililign, S. Laser Spectroscopy for Atmospheric and Environmental Sensing // Sensors (Basel). – 2009. – Vol. 9. – P. 10447–10512. – DOI: 10.3390/s91210447.

2. Selvaraj, R., Vasa, N. J., Nagendra, S. M. S., Mizaikoff, B. Advances in Mid-Infrared Spectroscopy-Based Sensing Techniques for Exhaled Breath Diagnostics // Molecules. – 2020. – Vol. 25. – P. 2227. – DOI: 10.3390/molecules25092227.

3. Goldenstein, C., Spearrin, R., Jeffries, J., Hanson, R. Infrared Laser-Absorption Sensing for Combustion Gases // Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. – Vol. 60. – P. 132–176. – DOI: 10.1016/j.pecs.2016.12.002.

4. Lackner, M. Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) in the Process Industries – A Review // Reviews in Chemical Engineering. – 2007. – Vol. 23. – P. 65–147. – DOI: 10.1515/REVCE.2007.23.2.65.

5. Ochkin, V. N. Spectroscopy of Low Temperature Plasma. – New York: Wiley-VCH, 2009. – 472 p.

6. Очкин, В. Н. Спектроскопия малых газовых составляющих неравновесной низкотемпературной плазмы // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192. – № 10. – С. 1145–1178.

7. Митчел, А., Земанский, М. Резонансное излучение и возбужденные атомы. – М.: ГТТИ, 1937. – 365 с.

8. Schmidt-Bleker, A., Winter, J., Iseni, S., Dunnbier, M., Weltmann, K.-D., Reuter, S. Reactive species output of a plasma jet with a shielding gas device—combination of FTIR absorption spectroscopy and gas phase modeling // Journal of

Physics D: Applied Physics. – 2014. – Vol. 47. – P. 145201. – DOI: 10.1088/0022-3727/47/14/145201.

9. Corcoran, T. C. Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy (LIF) // Laser Spectroscopy for Sensing: Fundamentals, Techniques and Applications / Ed. by M. Baudelet. – Elsevier Science, 2014. – P. 235–257.

10. Hodgkinson, J., Tatam, R. Optical Gas Sensing: A Review // Measurement Science and Technology. – 2013. – Vol. 24. – P. 012004. – DOI: 10.1088/0957-0233/24/1/012004.

11. Wojtas, J., Gluszek, A., Hudzikowski, A., Tittel, F. K. Mid-Infrared Trace Gas Sensor Technology Based on Intracavity Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – P. 513. – DOI: 10.3390/s17030513.

12. Скворцов, Л. А. Лазерные методы обнаружения следов взрывчатых веществ на поверхностях удаленных объектов // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – № 1. – С. 1–11.

13. Moore, D. S. Instrumentation for trace detection of high explosives // Review of Scientific Instruments. – 2004. – Vol. 75. – No. 8. – P. 2499–2512.

14. ITER Final Design Report No. G 31 DDD 14 01.07.19 W 0.1, Section 3.1: Vacuum Pumping and Fuelling Systems.

15. Засавицкий, И. И., Керимкулов, М. А., Наджединский, А. И., Очкин, В. Н., Савинов, С. Ю., Спиридонов, М. В., Шотов, А. П. Когерентные нестационарные эффекты при быстрой записи спектра поглощения // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т. 65. – С. 1198–1202.

16. Stepanov, E. V., Konyukhov, V. K., Pershin, S. M. Laser Analysis of the Evaporation Dynamics of Water Spin Isomers // Physics of Wave Phenomena. – 2024. – Т. 32. – № 3. – С. 241–248.

17. Бернацкий, А. В. и др. Измерение концентраций молекул воды в плазме с помощью комбинации спектральных и зондовых методов // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41. – № 9. – С. 767–777.