

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Бернацкого Антона Владиславовича "Спектроскопические методы детектирования примесей молекул воды и их производных в плазме инертных газов электровакуумных установок", представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – "Оптика".

В мощных термоядерных установках типа международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР тепловые потоки на стенки разрядных камер составляют сотни Вт/см². При таких высоких тепловых нагрузках необходимо интенсивное охлаждение стенок камер, которое, как правило, осуществляется проточной водой под высоким давлением. Так как рабочее давление газа в таких установках существенно ниже атмосферного (в камере ИТЭР начальное давление смеси дейтерия с тритием составляет 10⁻⁴ Па), то существует реальная опасность попадания паров воды в вакуумный объем разрядной камеры. Большие объемы вакуумных камер (в ИТЭР объем около 1000 м³) и чрезвычайно высокие требования на содержание в них примесных газов делают задачу контроля и локализации течей одной из главных проблем, от решения которой зависит успешная реализация проекта. Существующие в настоящее время методы и подходы к ее решению не удовлетворяют в полной мере всем предъявляемым требованиям. В свете сказанного, тема диссертации А.В. Бернацкого, посвященная разработке новых спектроскопических методов детектирования молекул воды, несомненно является **актуальной** и имеет большое научное и прикладное значение.

Диссертация состоит из Введения, 8 глав, Заключения и списка цитируемой литературы из 115 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, приведены цели и задачи работы, указана её научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы защищаемые положения, указан личный вклад автора.

Первая глава содержит обзор литературы, акцентированный на описании различных спектроскопических методик обнаружения потоков молекул воды в электровакуумных установках. Описываются требования, предъявляемые к диагностике контроля за герметичностью первой стенки реактора ИТЭР. На основании проведенного литературного обзора сделан вывод о том, что существующие методы контроля герметичности не удовлетворяют требованиям проекта ИТЭР.

Вторая глава посвящена описанию созданного экспериментального оборудования, приводятся его параметры. Подробно описаны диагностические системы, которые были использованы при проведении экспериментальных исследований.

В третьей главе приводится подробная расшифровка спектров в широкой области 300-900 нм, полученных диссертантом в различных газовых смесях с добавками паров воды. Автором выделен ряд линий, которые удобно использовать для диагностики воды в плазме. Приводятся результаты абсолютных спектральных измерений.

В четвертой главе диссертант предлагает и теоретически обосновывает новый подход для измерения концентраций молекул воды в плазме, основанный на процессе диссоциативного возбуждения молекул воды прямым электронным ударом. В результате этого процесса возникает возбужденный гидроксильный радикал ОН, вращательная температура которого значительно превышает поступательную температуру, в то время как вращательная температура свободного радикала ОН, возбуждаемого прямым электронным ударом из основного состояния, совпадает с поступательной. Т.о. по виду вращательного спектра гидроксильного радикала ОН (наличию в спектре "горячей" группы) можно сделать однозначный вывод о присутствии в плазме молекул воды. При этом измерения должны состоять из совокупности абсолютных оптических и зондовых измерений, необходимых для определения электронных параметров плазмы. С целью апробации предложенного подхода автор выполнил экспериментальные измерения концентраций молекул H_2O с использованием данного метода, которые продемонстрировали его превосходство (более высокую чувствительность) по сравнению со всеми другими известными спектроскопическими методами. Следует особо отметить, что достигнутая чувствительность полностью удовлетворяет требованиям проекта ИТЭР.

Пятая глава посвящена усовершенствованию и развитию известного метода измерений концентраций частиц в плазме - метода оптической актинометрии. Показано, что для корректного измерения концентраций частиц методом сравнения интенсивностей спектров излучения необходимо учитывать тушение излучающих состояний. Впервые предложена мультиспектральная схема измерений, которая самосогласованно учитывает тушение излучающих состояний, выбранных для измерений. Привлекательной особенностью разработанного подхода является то, что он позволяет проводить прямое определение концентраций частиц только посредством спектральных измерений без дополнительных измерений, например зондовых. Измерения концентраций молекул воды и её производных в плазме инертных газов, выполненные с использованием модифицированного метода актинометрии, показали высокую степень диссоциацию молекул воды.

В шестой главе проведено исследование процессов адсорбции молекул воды на внутренней поверхности вакуумной камеры установки "Течь". В результате проведенных исследований были установлены экспериментальные условия, в которых процессы адсорбции молекул воды стенками камеры не оказывают существенного влияния на результаты измерений концентраций молекул воды в объеме плазмы.

Седьмая глава посвящена дальнейшей модификации метода оптической актинометрии, вызванной спецификой работы реактора ИТЭР, которая диктует необходимость отказа от использования в диагностике ультрафиолетовой области спектра и переход в более длинноволновую область. С этой целью диссертантом было предложено использовать "промежуточные" актинометры, в качестве которых он использовал атомы водорода, появляющиеся в процессе диссоциации молекул воды. В выполненных им экспериментах была установлена линейная зависимость между концентрацией образовавшегося в разряде атомарного водорода (кислорода) из молекул H_2O , и начальной концентрацией молекул воды. Показано, что атом дейтерия, присутствующий в камере ИТЭР в качестве плазмообразующего газа, является практически идеальным актинометром для измерений концентраций атомов водорода. Экстраполяция полученных экспериментальных результатов в область условий реактора ИТЭР продемонстрировала рекордную чувствительность данного подхода.

С целью апробации развитого метода мультиспектральной актинометрии диссертант разработал и изготовил специальную установку, на которой выполнил экспериментальные измерения концентраций молекул воды в плазме двумя независимыми способами: методом мультиспектральной актинометрии и хорошо известным методом лазерной диодной спектроскопии по поглощению. Результаты этих измерений представлены в восьмой главе. Результаты одновременных измерений концентраций молекул воды в плазме двумя независимыми способами продемонстрировали хорошее совпадение друг с другом.

В Заключении сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Изложенные в диссертации результаты, опубликованы в 8 научных статьях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 1 монографии, 1 препринте, а также многократно докладывались на различных международных и всероссийских конференциях. Общее число публикаций по теме диссертации составило 25, все они соответствуют специальности 01.04.05 – "Оптика".

К числу наиболее важных и интересных новых результатов, полученных автором, следует отнести следующие:

1. Впервые предложен метод определения концентраций и потоков молекул воды в плазме, использующий характерную вращательную структуру гидроксильного радикала ОН.

2. Разработана и апробирована экспериментальная методика, самосогласованно учитывающая эффекты тушения излучающих состояний в методе актинометрии плазмы.

3. Разработан и апробирован метод промежуточного актинометра, имеющий рекордно высокую чувствительность определения концентраций молекул воды.

В качестве замечаний по диссертации можно отметить следующее:

1. При моделировании плазмохимических процессов в условиях эксперимента была использована без достаточного обоснования максвелловская функция распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). При этом для рассматриваемых условий в эксперименте зондовым методом были измерены ФРЭЭ. Представляется, что более корректно было использовать в расчетах экспериментально полученные ФРЭЭ.

2. При изложении результатов измерений концентраций молекул воды в плазме с привлечением зондовых измерений (Глава 4) приведены значения тока разряда, при котором проводились измерения, при этом величина напряжения не указана. Известно, что содержание паров воды в газе оказывает существенное влияние на величину напряжения горения разряда, т.е. на величину приведенной напряженности электрического поля, которая в неравновесной плазме определяет энергию электронов и, соответственно, степень диссоциации молекул воды.

3. Несмотря на то, что в целом материал работы изложен на хорошем литературном уровне, текст диссертации не лишен ряда опечаток и погрешностей. Так, например, на стр. 40 в подписи к рис. 3.2.11 стоит «Фрагмент 386-392 нм.». На самом деле на этом рисунке представлен фрагмент спектра 423-428 нм. На рис. 3.2.7 (стр. 38) наблюдается смещение представленного спектра примерно на 0.3 нм.

Отмеченные недостатки имеют частный характер и не снижают общий высокий уровень диссертационной работы.

Полученные автором результаты **актуальны** для установления характерного поведения примесных веществ в плазменных условиях, а так же их влияния на окружающие частицы. Результаты представляют большой интерес для разработки новых диагностических комплексов в составе высокоэнергичных электровакуумных камер.

Обоснованность и достоверность защищаемых положений и выводов подтверждается использованием современного экспериментального оборудования, а также соответствием результатов моделирования и эксперимента.

Диссертация А.В. Бернацкого является законченной научно-квалификационной работой, новизна работы не вызывают сомнений.

Автореферат диссертации полностью отражает её содержание.

Диссертационная работа А.В. Бернацкого **удовлетворяет всем требованиям** "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. А.В. Бернацкий заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – "Оптика".

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник Отдела низкотемпературной плазмы акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований",

доктор физико-математических наук

Трушкин Николай Иванович

06.09.2017г.

142190, Россия, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12,

e-mail: trushkin@triniti.ru, +7(495)841-52-36.

Подпись Трушкина Николая Ивановича удостоверяю:

Учёный секретарь акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"

кандидат физико-математических наук



Александр Александрович Ежов

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

официального оппонента Трушкина Николая Ивановича по тематике защищаемой диссертации Бернацкого Антона Владиславовича "Спектроскопические методы детектирования примесей молекул воды и их производных в плазме инертных газов электровакуумных установок", представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – "Оптика", в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. Akishev Y., Trushkin N., Grushin M., Petryakov A., Karal'nik, V. Atmospheric Pressure Pulsed-Periodical Spark Generator Forming Fast Moving Non-Equilibrium Plasma Clouds. - IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, v.40, №11, pp. 2806-2811.
2. Yu.S. Akishev, G.I. Aponin, A.A. Balakirev, M.E. Grushin, V.B. Karalnik, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin. Spatial-temporal development of a plasma sheet in a surface dielectric barrier discharge powered by a step voltage of moderate duration. - Plasma Sources Science and Technology, 2013, **22**, 015004 (9pp).
3. Yu.S. Akishev, G.I. Aponin, A.A. Balakirev, M.E. Grushin, V.B. Karalnik, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin. Stepwise expansion of a surface dielectric barrier discharge as a result of alternation in formation of streamers and leaders. - J. Phys. D: Appl. Phys. **46** (2013) 135204 (17pp).
4. Yu.S. Akishev, M.E. Grushin, A.I. Drachev, V.B. Karalnik, A.V. Petryakov and N.I. Trushkin. On Hydrophilicity Ageing of PP and PET Films Induced by Ultraviolet Radiation and Hydrogen Atoms. - The Open Plasma Physics Journal, 2013, 6, (Suppl 1: M4) 19-29.
5. Yu.S. Akishev, G.I. Aponin, A.A. Balakirev, M.E. Grushin, V.B. Karalnik, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin. DBD surface streamer expansion described using nonlinear diffusion of the electric potential over the barrier. - J. Phys. D: Appl. Phys. **46** (2013) 464014 (16pp).
6. Yu.S. Akishev, F. Arefi-Khonsari, A. Demir, V.B. Karal'nik, A.V. Petryakov, N.I. Trushkin. The interaction of positive streamers with bubbles floating on a liquid surface. - Plasma Sources Sci. Technol. 2015, v. 24, №6, 065021.
7. Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Старостин А.Н., Трушкин Н.И., Филиппов А.В. Сверхвысокая зарядка пылевых частиц пучково – плазменным методом для создания малогабаритного источника нейтронов. - Физика плазмы, 2016, т. 42, №1, с. 17-28.
8. Акишев Ю.С., Медведев М.А., Напартович А.П., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г. ОСОБЕННОСТИ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ДИФФУЗНОЙ

ПЛАЗМЕ В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ С СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ. - Физика плазмы, 2017, т.43, №4, с. 390-398.

9. Yu. Akishev, V. Karalnik, M. Medvedev, A. Petryakov, N. Trushkin, A. Shafikov. Propagation of Positive Streamers on a Small and Deep Tap Water in Wide and Narrow Dielectric Channels. - Plasma Sources Sci. Technol., 26, №2, 2017, 025004 (18pp).

10. Акишев Ю.С., Каральник В.Б., Петряков А.В., Старостин А.Н., Трушкин Н.И., Филиппов А.В. Выход нейтронов при соударении быстрых ионов дейтерия с сильно заряженными пылевыми частицами, насыщенными тритием. - ЖЭТФ, т.151, вып.2, 2017 с. 270-284.

11. Yu S Akishev, V B Karalnik, M A Medvedev, A V Petryakov, N I Trushkin and A G Shafikov. The probe measurements of the electron density in deuterium plasma created by the electron beam of moderate energy. - Journal of Physics: Conference Series, 789, 012002 (2017).