

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.04, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 03 декабря 2015 года публичной защиты диссертации Сорокина Дмитрия Алексеевича «Оптические свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, и ее применение» по специальности 01.04.05 – Оптика на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Время начала заседания: 14-30.

Время окончания заседания: 17-00.

На заседании присутствовали 19 из 24 членов диссертационного совета, из них 4 доктора по специальности 01.04.05 – Оптика:

1. доктор физико-математических наук Войцеховский Александр Васильевич – заместитель председателя диссертационного совета (01.04.05)
2. кандидат физико-математических наук Пойзнер Борис Николаевич – ученый секретарь (01.04.03)
3. доктор физико-математических наук Беличенко Виктор Петрович (01.04.03)
4. доктор физико-математических наук Дмитренко Анатолий Григорьевич (01.04.03)
5. доктор физико-математических наук Донченко Валерий Алексеевич (01.04.21)
6. доктор технических наук Дунаевский Григорий Ефимович (01.04.03)
7. доктор физико-математических наук Козырев Андрей Владимирович (01.04.03)
8. доктор физико-математических наук Копылова Татьяна Николаевна (01.04.21)
9. доктор физико-математических наук Лосев Валерий Федорович (01.04.21)

10. доктор физико-математических наук Самохвалов Игнатий Викторович
(01.04.05)

11. доктор физико-математических наук Соколова Ирина Владимировна
(01.04.21)

12. доктор физико-математических наук Солдатов Анатолий Николаевич
(01.04.21)

13. доктор физико-математических наук Соснин Эдуард Анатольевич
(01.04.05)

14. доктор физико-математических наук Тарасенко Виктор Федотович
(01.04.21)

15. доктор физико-математических наук Улеников Олег Николаевич
(01.04.05)

16. доктор физико-математических наук Фисанов Василий Васильевич
(01.04.03)

17. доктор физико-математических наук Шандаров Станислав Михайлович
(01.04.03)

18. доктор технических наук Юдин Николай Александрович (01.04.21)

19. доктор физико-математических наук Якубов Владимир Петрович
(01.04.03)

**Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор Войцеховский Александр
Васильевич.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Д.А. Сорокину ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.04
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования**

«Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Министерства образования и науки Российской Федерации

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 03 декабря 2015 г., № 114

О присуждении **Сорокину Дмитрию Алексеевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Оптические свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, и ее применение»** по специальности **01.04.05 – Оптика** принята к защите 29 сентября 2015 г., протокол № 112, диссертационным советом **Д 212.267.04** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 36, приказ о создании диссертационного совета № 937-671 от 23.05.2008 г.).

Соискатель **Сорокин Дмитрий Алексеевич**, 1986 года рождения.

В 2009 г. соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

В 2012 г. соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук.

Работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории оптических излучений в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Диссертация выполнена в лаборатории оптических излучений федерального государственного бюджетного учреждения науки Института сильноточной

электроники Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Ломаев Михаил Иванович**, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория оптических излучений, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Лисицын Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра лазерной и световой техники, профессор

Синица Леонид Никифорович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория молекулярной спектроскопии, заведующий лабораторией

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном **Оришичем Анатолием Митрофановичем** (доктор физико-математических наук, профессор, лаборатория № 3 «Лазерные технологии», заведующий лабораторией, руководитель научного направления), указала, что актуальность темы диссертационной работы Д.А. Сорокина обусловлена широкой востребованностью низкотемпературной неравновесной плазмы повышенного давления и крайне малым количеством информации о свойствах, в том числе оптических, плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в плотных газовых средах, позволяющего создавать такую плазму. Автором получены данные об основных параметрах плазмы (N_e , T_e , T_v , T_r , T_g и E/N), обнаружены усилительные свойства плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смесях инертных газов в

отношении ВУФ-излучения гетероядерных димеров инертных газов, показана возможность получения импульсов нейтронов длительностью ~ 1 нс при инициировании DD-реакции данным типом разряда. Полученные Д.А. Сорокиным результаты важны для развития теории явления высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в газах и смесях газов при повышенном давлении, а также для применения плазмы разряда данного типа в технике и технологиях, и могут быть использованы в научных учреждениях и предприятиях, занимающихся исследованием низкотемпературной плазмы, исследованием и созданием оптических квантовых генераторов, в том числе ВУФ-диапазона, и решением задач ядерной физики.

Соискатель имеет 40 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 40 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 20 (из них 4 статьи в зарубежных журналах, включенных в Web of Science, и 8 статей в российских научных журналах, переводные версии которых включены в Web of Science), монография – 1, публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций – 19 (из них 6 зарубежных конференций). Общий объем публикаций – 14,562 п.л., личный вклад автора – 3,791 п.л.

Наиболее значительные публикации по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. **Сорокин Д. А.** Концентрация и температура электронов в плазме диффузного разряда, формируемого при высоких перенапряжениях в плотных газах / **Д. А. Сорокин**, М. И. Ломаев, К. Ю. Кривоногова // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 80–85. – 0,55 / 0,25 п.л.

2. Tarasenko V. F. Formation of superpower volume discharges and their applications / V. F. Tarasenko, E. N. Baksht, A. G. Burachenko, M. I. Lomaev, D. V. Rybka, M. A. Shulepov, **D. A. Sorokin**, Yu. V. Shut'ko // Optics and Precision Engineering. – 2011. – V. 19, № 2. – P. 273–283. – 0,8 / 0,1 п.л. – DOI: 10.3788/OPE.20111902.0273

3. Ломаев М. И. Эмиссия нейтронов при наносекундном разряде в дейтерии в неоднородном электрическом поле / М. И. Ломаев, Б. А. Нечаев, В. Н. Падалко, С. И. Кузнецов, **Д. А. Сорокин**, В. Ф. Тарасенко, А. П. Яловец // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 1. – С. 126–132. – 0,61 / 0,1 п.л.

в переводной версии журнала: Lomaev M. I. Neutron emission from the nanosecond discharge in deuterium in a nonuniform electric field / M. I. Lomaev, B. A. Nechaev, V. N. Padalko, S. I. Kuznetsov, **D. A. Sorokin**, V. F. Tarasenko, A. P. Yalovets // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2012. – V. 57, № 1. – P. 124–130. – DOI: 10.1134/S106378421201015X

4. Ломаев М. И. Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле / М. И. Ломаев, **Д. А. Сорокин**, В. Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 3. – С. 226–229. – 0,3 / 0,15 п.л.

5. **Сорокин Д. А.** Определение плотности и температуры электронов, а также приведенной напряженности электрического поля в плазме высоковольтного наносекундного разряда в азоте атмосферного давления, инициируемого пучком убегающих электронов / **Д. А. Сорокин**, М. И. Ломаев, Т. И. Баноккина, В. Ф. Тарасенко // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, вып. 8. – С. 13–20. – 0,63 / 0,22 п.л.

в переводной версии журнала: **Sorokin D. A.** Determination of the electron concentration and temperature, as well as the reduced electric field strength, in the plasma of a high-voltage nanosecond discharge initiated in atmospheric-pressure nitrogen by a runaway electron beam / **D. A. Sorokin**, M. I. Lomaev, T. I. Banokina, V. F. Tarasenko // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 59, № 8. – P. 1119–1126. – DOI: 10.1134/S1063784214080234

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В.М. Лисицын** и **Л.Н. Сеница** являются известными учеными в области оптики по направлениям, соответствующим тематике диссертационной работы («Люминесценция», «Источники света», «Физические основы методов и техники спектроскопии»); **Институт теоретической и прикладной механики**

им. С.А. Христиановича СО РАН известен своими исследованиями по взаимодействию мощного лазерного излучения с веществом (материалы для машиностроения, медицины, сверхзвуковые потоки воздуха), достижениями в механике жидкости, газа и плазмы, теплофизике и теоретической теплотехнике.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **А.А. Пикулев**, начальник научно-исследовательского отдела Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института экспериментальной физики, г. Саров, *с замечаниями* об отсутствии в автореферате проверки выполнимости в плазме разряда в азоте атмосферного давления условия $v_{ee} \gg v_{ea}$; о расхождении значений увеличения интенсивности излучения плазмы бинарных смесей инертных газов в промежутке с лезвийным катодом длиной 30 мм при постановке Al зеркала и в промежутке с лезвийным катодом длиной 50 мм без использования Al зеркала; о возможности повышения выхода нейтронов в результате DD-реакции.
2. **С.В. Автаева**, д-р физ.-мат. наук, доц., ведущий научный сотрудник отдела прикладной физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета, *с замечаниями* о возможности получения более точных результатов при измерении электронной температуры и приведенной напряженности электрического поля при использовании соотношения интегральных интенсивностей ионной и молекулярной полос азота, а не пиковых интенсивностей данных полос; об отсутствии в автореферате подробного описания измерения газовой температуры и дополнительных фактов, кроме увеличения интенсивности, указывающих на наличие усиления ВУФ-излучения в плазме бинарных смесей инертных газов.
3. **Ю.С. Акишев**, д-р физ.-мат. наук, проф., начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, *с замечанием* об отсутствии в автореферате проверки выполнимости в плазме разряда в азоте атмосферного давления условия $v_{ee} \gg v_{ea}$.
4. **А.М. Бойченко**, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории физики импульсных газоразрядных лазеров Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва, *с замечанием* об отсутствии в автореферате

оценки коэффициента усиления среды и иных точек зрения на природу ВУФ-излучения плазмы бинарных смесей инертных газов. 5. **Г.Н. Зверева**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории Н-3601 Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург, с замечаниями об отсутствии в автореферате ссылок на работы W. Sasaki; об отсутствии в автореферате полного спектра в ВУФ-диапазоне излучения плазмы разряда в бинарных смесях инертных газов; о недостаточности обоснованности наличия усилительных свойств плазмы бинарных смесей инертных газов фактом трехкратного увеличения интенсивности при постановке зеркала.

В отзывах отмечается востребованность для науки и практики неравновесной низкотемпературной плазмы, реализуемой при возбуждении газовых сред высокого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, являющимся перспективным методом создания такой плазмы при давлениях порядка атмосферного и выше, научная и практическая значимость результатов определения методами оптической эмиссионной спектроскопии основных параметров плазмы импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами. Указывается, что обнаружение усилительных свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси инертных газов Ar-He в отношении ВУФ-излучения гетероядерного димера ArHe^* представляется перспективным с точки зрения возможности создания электроразрядного лазера, излучающего в ВУФ-области спектра. Отмечается потенциальная важность получения импульсов нейтронов, испускаемых в результате DD-реакции, и тормозного рентгеновского излучения в условиях возбуждения дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, с длительностью ~ 1 нс и менее.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

доказана возможность использования метода, основанного на определении соотношения пиковых интенсивностей ионной (391,4 нм) и молекулярной полос

(394,3 нм) азота, для определения электронной температуры T_e и приведенной напряженности электрического поля E/N в низкотемпературной плазме импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в азоте атмосферного давления;

установлено, что низкотемпературная плазма, формируемая в условиях возбуждения газовых сред повышенного давления (порядка атмосферного и выше) высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, является плотной и неравновесной;

установлена природа ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм, испускаемого плазмой высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарных смесях инертных газов He-Xe и Ar-Xe при содержании ксенона в смеси 0,1-1 %;

установлено наличие усилительных свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарной смеси инертных газов Ar-Xe по отношению к ВУФ-излучению гетероядерного димера $ArXe^*$ вблизи длины волны 147 нм;

показана принципиальная возможность испускания нейтронов в результате реакции $d(d,n)^3He$, инициируемой в результате возбуждения дейтерия при давлении доли-единицы Торр высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, в промежутке с потенциальным анодом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм и плоским дейтерированным катодом;

установлено, что длительность импульсов нейтронов и рентгеновского излучения, регистрируемых при возбуждении дейтерия низкого давления высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, составляет не более $\sim 1,5$ и $\sim 0,8$ нс, соответственно.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

применительно к проблематике диссертационной работы проведено доказательство возможности использования и эффективно применен спектральный метод, основанный на определении соотношения пиковых интенсивностей ионной и молекулярной полос азота, для измерения электронной

температуры T_e и приведенной напряженности электрического поля E/N в плазме азота атмосферного давления, формируемой в условиях импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами;

обосновано использование спектрального метода, основанного на построении графика Больцмана, для измерения температуры тяжелых частиц T_g в плазме импульсного и импульсно-периодического высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в азоте атмосферного давления;

изучено влияние содержания ксенона на вид спектрального распределения энергии излучения в ВУФ-области спектра вблизи длины волны 147 нм плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарных смесях инертных газов He-Xe и Ar-Xe;

доказано при помощи времяпролетного метода, что в условиях возбуждения дейтерия при давлениях доли-единицы Торр высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, в промежутке с потенциальным анодом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм и плоским дейтерированным катодом имеет место испускание нейтронов и тормозного рентгеновского излучения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

полученные данные об основных параметрах плазмы (N_e , T_e , T_v , T_r , T_g и E/N) высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в ряде газов повышенного давления (порядка атмосферного и выше) представляют ценность для анализа плазмо-химических процессов, важных с точки зрения использования данного плазменного объекта в качестве основы технических устройств и технологических процессов, например, источников спонтанного и вынужденного излучения, в том числе и в ВУФ-области спектра;

определены условия, обеспечивающие усиление ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм гетероядерного димера инертных газов ArXe* в плазме

высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar-Xe, что является перспективным с точки зрения создания ВУФ-лазера с электроразрядной накачкой активной среды;

показана возможность и определены условия испускания нейтронных потоков длительностью ~ 1 нс в результате $d(d,n)^3\text{He}$ реакции, инициируемой в условиях высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в дейтерии низкого давления в промежутке с дейтерированной мишенью, что может быть использовано при создании короткоимпульсных нейтронных источников, необходимых для решения ряда задач прикладной ядерной физики (радиография быстрых процессов, элементный анализ и др.);

работа выполнялась в рамках: государственного контракта № 02.740.11.0562 от 22.03.2010 г. НИР «Источники спонтанного и лазерного излучения с высокой импульсной и средней мощностью излучения и их применение в науке, медицине и технике» (2010 – 2012 гг.); гранта РФФИ № 10-08-00556-а «Получение генерации на димерах инертных газов ВУФ области спектра при накачке наносекундным разрядом» (2010 – 2012 гг.); контракта FR-11/11 с французской компанией “AirLiquid”, «Проведение научной работы по созданию источника диффузной плазмы атмосферного давления на основе импульсно-периодического разряда и проведение экспериментального исследования свойств плазмы» (2011 – 2012 гг.); контракта FR-11/13 с французской компанией “AirLiquid”, «Проведение научной работы по исследованиям очистки поверхностей металлов и диэлектриков, а также по получению диффузного разряда в смесях с прекурсором» (2013 г.).

Рекомендации об использовании результатов исследования. Полученные результаты могут быть использованы в организациях, в которых проводятся работы по спектроскопии плазмы, исследованию свойств и возможностей применения низкотемпературной неравновесной газоразрядной плазмы повышенного давления, исследованию и созданию источников спонтанного и вынужденного излучения ВУФ-диапазона спектра, а также в областях теоретической и прикладной ядерной физики: Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), Государственный оптический институт

им. С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург), Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики (г. Саров).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты физического эксперимента получены при использовании стандартных методов исследования и сертифицированного оборудования;

показана воспроизводимость экспериментальных результатов;

установлено согласие результатов, представленных в диссертационной работе, с представленными в литературе результатами физического эксперимента и теоретических расчетов других авторов.

Научная новизна диссертационного исследования состоит: в определении методами оптической эмиссионной спектроскопии основных параметров плазмы (N_e , T_e , T_v , T_r , T_g и E/N), формируемой в условиях возбуждения импульсным и импульсно-периодическим высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, атомарных и молекулярных газов при давлениях порядка атмосферного и выше; исследовании амплитудно-временных и спектральных характеристик ВУФ-излучения (вблизи длины волны 147 нм) плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смесях инертных газов He-Xe и Ar-Xe при повышенном давлении; обнаружении усилительных свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar-Xe в отношении ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм; получении испускания нейтронов в результате DD-реакции, инициируемой в условиях возбуждения дейтерия при давлении доли-единицы Торр высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, в промежутках с потенциальным анодом с радиусом кривизны десятки-сотни мкм, при использовании заземленных дейтерированных катодов-мишеней и катодов, не обогащенных дейтерием или тритием.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии на всех этапах выполнения диссертационной работы: в постановке задачи, создании и

настройке экспериментальной установки, в проведении физического эксперимента, а также теоретических оценок и расчетов; в последующих обработке, анализе и интерпретации полученных данных; изложении и обосновании результатов в диссертационной работе; апробации результатов исследования; подготовке публикаций на основе полученных результатов.

Диссертация соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи определения основных параметров и оптических свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в газах и смесях газов повышенного давления (порядка атмосферного и выше), имеющей существенное значение для развития отрасли плазменных технологий и направления, связанного с созданием лазеров ВУФ-диапазона спектра с электроразрядным способом накачки активной среды.

На заседании 03 декабря 2015 г. диссертационный совет принял решение присудить **Сорокину Д.А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 19 человек, из них 4 доктора наук по специальности 01.04.05 – Оптика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 19, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Войцеховский

Войцеховский Александр Васильевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пойзнер

Пойзнер Борис Николаевич

03 декабря 2015 г.