

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 26 декабря 2016 года публичной защиты диссертации Белоплотова Дмитрия Викторовича «Оптическое излучение плазмы высоковольтных наносекундных разрядов, формируемых в неоднородном электрическом поле в условиях генерации убегающих электронов» по специальности 01.04.05 – Оптика на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

На заседании присутствовали 20 из 25 членов диссертационного совета, в том числе 6 докторов наук по специальности 01.04.05 – Оптика:

- | | |
|--|----------|
| 1. Войцеховский А.В., доктор физико-математических наук
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.04.05 |
| 2. Пойзнер Б.Н., кандидат физико-математических наук
учёный секретарь диссертационного совета, | 01.04.03 |
| 3. Артюхов В.Я., доктор физико-математических наук, | 01.04.21 |
| 4. Беличенко В.П., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |
| 5. Дмитренко А.Г., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |
| 6. Донченко А.Г., доктор физико-математических наук | 01.04.21 |
| 7. Дунаевский Г.Е., доктор технических наук | 01.04.03 |
| 8. Кабанов М.В., доктор физико-математических наук | 01.04.05 |
| 9. Козырев А.В., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |
| 10. Самохвалов И.В., доктор физико-математических наук | 01.04.05 |
| 11. Соколова И.В., доктор физико-математических наук, | 01.04.21 |
| 12. Солдатов А.Н., доктор физико-математических наук | 01.04.21 |
| 13. Соснин Э.А., доктор физико-математических наук | 01.04.05 |
| 14. Тарасенко В.Ф., доктор физико-математических наук | 01.04.21 |
| 15. Улеников О.Н., доктор физико-математических наук, | 01.04.05 |
| 16. Фисанов В.В., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |
| 17. Черепанов В.Н., доктор физико-математических наук, | 01.04.05 |
| 18. Шандаров С.М., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |
| 19. Юдин Н.А., доктор технических наук | 01.04.21 |
| 20. Якубов В.П., доктор физико-математических наук | 01.04.03 |

В связи с невозможностью присутствия на заседании председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Майера Георгия Владимировича по его письменному поручению 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 – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Д. В. Белоплотову 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 26.12.2016 г., № 128

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

Диссертация **«Оптическое излучение плазмы высоковольтных наносекундных разрядов, формируемых в неоднородном электрическом поле в условиях генерации убегающих электронов»** по специальности **01.04.05** – Оптика, принята к защите 06.10.2016 г., протокол № 121, 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, 36, приказ о создании диссертационного совета № 937-671 от 23.05.2008 г.).

Соискатель **Белоплов Дмитрий Викторович**, 1989 года рождения.

В 2012 году соискатель окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2016 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

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; по совместительству – в должности младшего научного сотрудника лаборатории оптической

электроники Сибирского физико-технического института имени академика В. Д. Кузнецова в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Диссертация выполнена на кафедре квантовой электроники и фотоники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации и 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, **Тарасенко Виктор Федотович**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория оптических излучений, заведующий лабораторией; по совместительству – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра квантовой электроники и фотоники, профессор.

Научный консультант – 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; по совместительству – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория интеллектуальных диагностических радиационных и лазерно-оптических систем и технологий, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Латуш Евгений Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», кафедра квантовой радиофизики, профессор

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
дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Томск, в своем положительном заключении, подписанном **Шияновым Дмитрием Валерьевичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория квантовой электроники, старший научный сотрудник), указала, что наносекундные разряды в газе, формируемые в условиях генерации убегающих электронов, благодаря которым возможно зажигание объемного разряда в газах атмосферного давления без предварительной ионизации третьим источником, являются перспективными с точки зрения их применения в науке и технике. Исследование оптических свойств такого разряда имеет первостепенное значение как при изучении самой плазмы, так и при ее применении, например, в качестве источников спонтанного и вынужденного излучения, а также для плазменных технологий. Поэтому тема диссертационной работы Белоплотова Д.В. является актуальной, а результаты исследований – востребованными. К основным научным результатам диссертационной работы следует отнести следующие: обнаружены условия, в которых при наносекундном импульсно-периодическом разряде при неоднородном распределении напряженности электрического поля образуются пары материала электрода, излучающие на переходах атомов и ионов металлов, и сохраняются свойства диффузного разряда; с помощью предложенного автором диссертации оптического

метода исследования динамики развития ионизационных процессов при субнаносекундном пробое промежутка показано, что пробой промежутка, заполненного азотом повышенного давления, совершается за счет прохождения двух волн ионизации – прямой и обратной; установлено, что в наносекундном импульсно-периодическом разряде при неоднородном распределении напряженности электрического поля наибольшая интенсивность излучения второй положительной системы азота в центре разрядного промежутка в два раза выше, чем в приэлектродных областях. При этом температура газа в центральной части промежутка в 2–4 раза меньше, чем в приэлектродных областях; обнаружено, что при наносекундном импульсно-периодическом разряде в азоте в условиях образования паров меди наблюдается длительная люминесценция атомов меди (1–2 мс), возбуждаемых при резонансной передаче энергии от молекул азота, находящихся в метастабильном состоянии, атомам меди. С помощью предложенного оптического метода появляется возможность исследовать динамику ионизационных процессов в газоразрядном промежутке при временах запаздывания пробоя ~ 1 нс.

Соискатель имеет 16 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 16 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 11 (из них 2 статьи в зарубежных научных журналах, индексируемых Web of Science, 7 статей в российских научных журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science и Scopus), в монографиях – 1 (соавтор главы), в неиндексируемом зарубежном научном журнале – 2, в сборниках докладов материалов международной и всероссийской конференции – 2 (их них 1 публикация в сборнике, индексируемом Scopus). Общий объем публикаций – 8,33 п.л., авторский вклад – 2,45 п.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных

изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и индексируемых Web of Science:

1. Lomaev M. I. Breakdown features of a high-voltage nanosecond discharge initiated with runaway electrons at subnanosecond voltage pulse rise time / M. I. Lomaev, **D. V. Beloplotov**, V. F. Tarasenko, D. A. Sorokin // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2015. – Vol. 22, is. 4. – P. 1833–1840. – 0,75 / 0,19 п.л. – DOI: 10.1109/TDEI.2015.005008

2. Тарасенко В. Ф. Динамика ионизационных процессов в азоте, воздухе и SF₆ высокого давления при субнаносекундном пробое, инициируемом убегающими электронами / В. Ф. Тарасенко, **Д. В. Белоплотов**, М. И. Ломаев // Физика плазмы. – 2015. – Т. 41, № 10. – С. 902–917. – 1,46 / 0,49 п.л.

в переводной версии журнала

Tarasenko V. F. Dynamics of Ionization Processes in High-Pressure Nitrogen, Air, and SF₆ during a Subnanosecond Breakdown Initiated by Runaway Electrons / V. F. Tarasenko, **D. V. Beloplotov**, M. I. Lomaev // Plasma Physics Reports. – 2015. – Vol. 41, is. 10. – P. 832–846. – DOI: 10.1134/S1063780X15100098

3. **Белоплотов Д. В.** Люминесценция атомов и ионов алюминия при импульсно-периодическом наносекундном разряде, инициируемом убегающими электронами, в азоте / Д. В. Белоплотов, В. Ф. Тарасенко, М. И. Ломаев // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 2. – С. 96–101. – 0,41 / 0,14 п.л.

4. **Белоплотов Д. В.** Визуализация газодинамических процессов при импульсно-периодическом разряде, инициируемом убегающими электронами, в воздухе атмосферного давления с помощью лазерного монитора / Д. В. Белоплотов, М. В. Тригуб, В. Ф. Тарасенко, Г. С. Евтушенко, М. И. Ломаев // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 2. – С. 157–161. – 0,39 / 0,08 п.л.

в переводной версии журнала:

Beloplotov D. V. Laser monitor visualization of gas-dynamic processes under pulse-periodic discharge initiated by runaway electrons in atmospheric pressure air / D. V. Beloplotov, M. V. Trigub, V. F. Tarasenko, G. S. Evtushenko, M. I. Lomaev //

Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29, is. 4. – P. 371–375. – DOI: 10.1134/S1024856016040047

5. Ломаев М. И. Спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы импульсно-периодического разряда, инициируемого убегающими электронами / М. И. Ломаев, **Д. В. Белоплотов**, Д. А. Сорокин, В. Ф. Тарасенко // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 179–183. – 0,34 / 0,09 п.л.

в переводной версии журнала:

Lomaev M. I. Spectral and amplitude–time characteristics of radiation of plasma of a repetitively pulsed discharge initiated by runaway electrons / M. I. Lomaev, **D. V. Beloplotov**, D. A. Sorokin, V. F. Tarasenko // Optics and Spectroscopy. – 2016. – Vol. 120, is. 2. – P. 171–175. – DOI: 10.1134/S0030400X16020168

На автореферат поступили 7 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **В.А. Ямщиков**, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, заместитель директора по научной работе Института электрофизики и электроэнергетики РАН, г. Санкт-Петербург, *с замечаниями*: промежутки с неоднородным полем характеризуются коэффициентом неоднородности – отношением максимальной к средней напряженности поля в промежутке. Следовало бы указать примерные значения этих коэффициентов для конфигурации электродов исследуемых разрядных промежутков. В автореферате не сказано, каким фоторегистратором проводились измерения временного хода интенсивности излучений из плазмы.
2. **Ю.С. Акишев**, д-р физ.-мат. наук, проф., начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований, *с замечанием*: на странице 19 указано, что вероятной причиной меньшей интенсивности излучения на переходе $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ вблизи электродов являются процессы ступенчатой ионизации, приводящие к быстрому опустошению $C^3\Pi_u$ -состояния молекулы азота вследствие высокой концентрации электронов. В связи с этим предположением было бы интересно сравнить скорости соответствующих процессов со скоростью радиационного распада $C^3\Pi_u$ -состояния.

3. **А.М. Бойченко**, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории газоразрядных лазеров Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН г. Москва, *с замечанием*: на стр. 11 читаем, что посредством регистрации временного хода интенсивности излучения полос $C^3P_u - B^3P_g$ -перехода молекулы азота из различных зон разрядного промежутка получено выражение (1), фигурирующее в защищаемых положениях. Не совсем понятно, что хочет сказать автор. Выражение (1) феноменологическое? В третьей главе исследуются процессы ионизации, в частности, скорость волн ионизации, но величины скоростей не приводятся, упоминаются только относительные значения (рис. 5). Речь везде идет о волнах ионизации. Откуда у диссертанта такая уверенность? Может, это волны размножения электронов фона? 4. **В.И. Соломонов**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории квантовой электроники Института электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, *с замечанием*: в автореферате нет экспериментальных доказательств или косвенных подтверждений того, что автор исследует высоковольтный импульсный разряд именно в условиях убегания электронов. Более того, на осциллограммах рис. 4 и 6 не видно тока убегающих электронов. 5. **Н.А. Ашурбеков**, д-р физ.-мат. наук, проф., проректор по научной работе и инновациям Дагестанского государственного университета, г. Махачкала, *с замечанием*: в автореферате было бы желательно приводить оценки плотности метастабильных молекул азота через миллисекунду после окончания импульса тока и сравнить время люминесценции атомов меди с временем поперечного разлета паров меди в результате диффузии или газодинамических процессов. 6. **С.В. Автаева**, д-р физ.-мат. наук, доц., ведущий научный сотрудник отдела прикладной физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета, *с замечанием*: слабо обосновано утверждение о том, что вероятной причиной меньшей интенсивности излучения 2-й положительной системы азота в приэлектродных областях по сравнению с центральной областью разряда являются процессы ступенчатой ионизации. 7. **Г.Н. Зверева**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории 3601 Государственного оптического института

им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург, с замечанием: в третьей главе предлагается оптический метод исследования динамики ионизационных процессов, в то время как в автореферате не представлены временные зависимости излучения, определяющие изучаемую динамику; в автореферате не приводится анализ преимущества исследования материалов с помощью испарения катодов в разрядах с убегающими электронами по сравнению с уже имеющимися методами; в тексте автореферата (стр. 16) имеются грамматические ошибки.

В отзывах отмечается, что в последние годы возможность формирования однородной плазмы в газах высокого давления, в частности, атмосферного, открывает перспективы применения разрядов, инициируемых убегающими электронами, в химии, биологии, медицине. В связи с этим несомненна актуальность тематики диссертационной работы, обусловленная применением высоковольтных наносекундных разрядов в современных технологиях сильноточной электроники. Благодаря генерации убегающих электронов, определяющих главное свойство такого разряда – его однородность в газах атмосферного давления, высоковольтный наносекундный разряд является привлекательным с точки зрения создания источников излучения. Кроме того, исследование оптических свойств позволяет определять параметры плазмы и процессы в них. К важным результатам отнесена разработка оптического метода диагностики ионизационных процессов в предпробойной стадии разряда путем установления связи между параметрами излучения и приведенной напряженностью электрического поля. Отмечаются также результаты исследования оптических свойств плазмы наносекундного импульсно-периодического разряда в условиях образования паров материала электродов и их нетривиальность. Основные результаты работы являются новыми и вносят вклад в изучение оптических свойств высоковольтных наносекундных разрядов, инициируемых убегающими электронами.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **Е.Л. Латуш** является высококвалифицированным специалистом в области изучения газоразрядных источников вынужденного излучения на парах металлов;

В.М. Лисицын является высококвалифицированным специалистом в области радиационной физики оптических материалов; **Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН** является ведущим научным центром в области спектроскопии, а также разработки газоразрядных источников вынужденного излучения на парах металлов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложен оптический метод исследования динамики ионизационных процессов при субнаносекундном пробое газоразрядного промежутка, заполненного азотом либо азотосодержащей смесью, в условиях генерации убегających электронов, который устанавливает связь между интенсивностью излучения полос второй положительной системы молекулы азота и приведенной напряженностью электрического поля;

установлены причины и условия эффективного распыления материала электродов при наносекундном импульсно-периодическом разряде в промежутке «острие–плоскость» в диффузном и контрагированном режимах, сопровождающегося люминесценцией атомов и ионов металлов в ультрафиолетовом и видимом диапазонах длин волн, а также образованием высокодисперсных порошков;

установлены особенности распределения интенсивности излучения полос второй положительной системы молекулы азота и температуры газа вдоль разрядного промежутка «острие–плоскость» при наносекундном импульсно-периодическом разряде: в центральной части разрядного промежутка интенсивность излучения полос второй положительной системы молекулы азота выше в два и более раз, чем в приэлектродных областях, а температура газа в 2–4 раза меньше, чем в приэлектродных областях;

доказана возможность визуализации процесса разлета продуктов наносекундного импульсно-периодического разряда, формируемого в азоте и воздухе в условиях образования паров материала электродов из меди, длительным (~1–2 мс) послесвечением атомов меди, возбуждаемых при столкновениях с молекулами азота, находящимися в метастабильном состоянии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана применимость полученной математической связи между интенсивностью излучения полос перехода второй положительной системы молекулы азота и приведенной напряженностью электрического поля для исследования динамики ионизационных процессов в предпробойной стадии наносекундного разряда в промежутке с неоднородным распределением напряженности электрического поля, заполненном азотом либо азотосодержащей смесью высокого давления, в условиях генерации убегающих электронов;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы спектральные методы определения средних значений величин приведенной напряженности электрического поля и температуры газа в различных частях промежутка «острие–плоскость», заполненного азотом, при наносекундном импульсно-периодическом разряде в условиях образования паров материала электродов;

изложены условия, при которых при наносекундном импульсно-периодическом разряде: наблюдается люминесценция атомов и ионов металла; образуются высокодисперсные порошки; обеспечивается визуализация процесса разлета продуктов разряда.

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

разработан оптический метод исследования динамики ионизационных процессов в газоразрядном промежутке при временах запаздывания пробоя ~ 1 нс.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут быть использованы в научных и образовательных учреждениях, в которых ведутся исследования и разработки газоразрядных источников спонтанного излучения на переходах атомов и ионов металлов, источников высокодисперсных порошков, исследования в области спектроскопии газоразрядной плазмы, а также в области физики газового разряда: Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова (г. Санкт-Петербург), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), Новосибирский

национальный исследовательский государственный университет, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (г. Санкт-Петербург), Институт электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург), Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики (г. Саров), Институт спектроскопии РАН (г. Москва) и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

результаты получены на сертифицированном оборудовании в контролируемых условиях при многократном ($\sim 10^2$ – 10^3 реализаций) воспроизведении с последующей оценкой ошибок измерений;

использовано сравнение авторских результатов с результатами, полученными ранее по рассматриваемой тематике;

установлено качественное согласие авторских результатов с результатами экспериментальных работ и численных расчетов, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Научная новизна работы заключается в том, что предложен оптический метод исследования динамики ионизационных процессов, протекающих в газоразрядном промежутке на стадии запаздывания пробоя длительностью ~ 1 нс, который позволяет установить динамику электрического поля в промежутке посредством оптических измерений; установлены условия, в которых наносекундный импульсно-периодический разряд может применяться для получения высокодисперсных порошков, а также служить источником излучения на переходах атомов и ионов металлов при сохранении свойств и параметров диффузного разряда; исследовано распределение температуры газа, потоков продуктов разряда, а также особенности распределения интенсивности излучения полос второй положительной системы молекулы азота в промежутке «острие–плоскость» при наносекундном импульсно-периодическом разряде в условиях образования паров материала электродов, а также в условиях резонансной передачи энергии молекулами азота, находящимися в метастабильном состоянии, атомам меди.

Личный вклад соискателя состоит в: непосредственном участии на всех этапах процесса: постановке цели и задач, разработке экспериментальных стендов и установок, получении данных, обработке и интерпретации данных, проведении оценок, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи определения оптических параметров излучения плазмы наносекундного разряда, инициируемого убегаящими электронами, в различных режимах, включая те, при которых образуются пары материала электродов, имеющей значение для развития оптики, в частности, диагностики природных и техногенных объектов и процессов, а также источников света.

На заседании 26.12.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Белоплотову Д.В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 6 докторов наук по специальности 01.04.05 – Оптика, участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя
диссертационного совета

Ученый секретарь
диссертационного совета

26.12.2016 г.



Войцеховский
Александр Васильевич

Пойзнер
Борис Николаевич