

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.070.01 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 06.09.2024 г. № 1

О присуждении Ткаченко Роману Андреевичу, гражданину России, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Импульсные газоразрядные индукционные лазеры на переходах молекулярного азота и нейтральных атомов неона и ксенона»** по специальности «1.3.6 – Оптика» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук принята к защите 22.05.2024 г., протокол № 5, диссертационным советом 24.1.070.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 15Б, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Ткаченко Роман Андреевич, 1995 года рождения, в 2017 году освоил программу бакалавриата Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки 03.03.02 «Физика». В 2019 году с отличием освоил программу магистратуры Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика». В 2023 году освоил программу подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук» по специальности 1.3.6 «Оптика». Основное место работы соискателя – Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Лаборатории импульсных газоразрядных лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук. Представленные в диссертации и автореферате результаты получены Р.А. Ткаченко лично либо при его прямом участии. Соискатель занимался разработкой и созданием высоковольтных систем формирования импульсного индукционного разряда, проводил экспериментальные исследования, их обработку и анализ, подготавливал научные статьи для публикации в

Российских и зарубежных журналах, выступал с постерными и устными докладами на отечественных и международных конференциях.

Научный руководитель: **Ражев Александр Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор по специальности «Лазерная физика», главный научный сотрудник Лаборатории импульсных газоразрядных лазеров ИЛФ СО РАН.

Официальные оппоненты, давшие положительные отзывы на диссертацию:

Ломаев Михаил Иванович – доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.05 – Оптика), ведущий научный сотрудник Лаборатории оптических излучений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН).

Бохан Петр Артемович – доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.05 – Оптика), главный научный сотрудник Лаборатории мощных газовых лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН).

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), г. Санкт-Петербург, дала положительный отзыв на диссертацию. Отзыв составлен заведующим кафедрой «Оптики, спектроскопии и физики плазмы» СПбГУ, доктором физико-математических наук, профессором Тимофеевым Николаем Александровичем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обоснован их компетентностью в области оптики, спектральных исследований, физики лазеров и газовых разрядов, физики кинетических процессов в разрядной плазме, известностью своими достижениями в этих областях и способностью оценить научную и практическую ценность диссертации.

В своем положительном заключении ведущая организация указала, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, имеющую важное теоретическое и практическое значение для оптики, спектроскопии и лазерной физики, обладающую большой научной и практической ценностью.

В отзыве **ведущей организации** присутствуют следующие замечания:

1) На стр. 94 диссертации отмечается, что «лазерная генерация возникала на переднем фронте импульса накачки с минимальной задержкой между импульсом возбуждения и появлением оптического импульса генерации ксенона (см. рисунок 4.5). Таким образом, формирование лазерного излучения происходит до момента зажигания индукционного разряда во время стадии

емкостного разряда, формируемого за счет разницы потенциалов между соседними витками индуктора». В связи с этим возникает вопрос, возможно ли тогда было бы обойтись емкостным разрядом без создания индукционного разряда? Дополнительную информацию об этом могло бы дать сравнение напряженностей продольного и вихревого электрических полей, возникающих в индукторе.

2) В диссертации большое внимание уделяется техническим вопросам создания индукционного разряда. Это вполне объяснимо, поскольку основной задачей работы была разработка новых разрядных лазеров и поиск оптимальных условий их работы. Рассмотрению протекающих в плазме процессов, за счет которых возникает инверсная заселенность, уделено мало внимания. Данное рассмотрение было бы уместным и полезным, потому что вопросы о процессах заселения лазерных уровней – прямым электронным ударом, в результате рекомбинации или в результате других процессов, весьма важны.

3) Диссертационная работа написана хорошим языком и легко читается. Тем не менее, возникают некоторые вопросы, требующие разъяснений. Например, на стр. 34 в уравнения (2.3) и (2.4) входит величина P – плотность мощности, которая по размерности таковой не является. На стр. 55 обсуждаются механизмы опустошения нижнего лазерного уровня за счет процессов тушения, в том числе ионизации атома примеси, энергия ионизации которого меньше энергии нижнего лазерного уровня. При этом в качестве такого атома среди других приводится атом гелия, который имеет самую большую энергию ионизации из всех атомных систем. Очевидно, что он не может быть использован в качестве такой тушащей частицы. Следует также отметить отсутствие оценки погрешности результатов измерений и получаемых расчетных величин. Например, на стр. 49 приведена оценка вкладываемой в условиях максимальной энергии излучения в индукционный разряд запасенной энергии системы возбуждения, равная 54.5%. Эта величина представляется определенной слишком точно.

Замечания оппонентов:

- В тексте автореферата и диссертации при описании энергопровода в активную среду используется термин «возбуждение» вместо общепринятого «накачка».

- В подписях к рис. 1.6, 1.8 используется выражение: « M – добротное зеркало с алюминиевым покрытием», что на мой взгляд ошибочно, поскольку добротность – это характеристика резонатора, а не зеркала, которое характеризуется коэффициентом отражения.

- На стр. 19 текста диссертации указано: «...при использовании трубок меньшего внутреннего диаметра применение цилиндрического индукционного

разряда становится не эффективным из-за малой напряженности электрического поля, а также недостаточного коэффициента магнитной связи (см. раздел 1.2).» В тоже время, из соотношения (1.2) ($k = S_{кат.}/S_{пл.}$) раздела 1.2 следует, что коэффициент магнитной связи k увеличивается по мере уменьшения величины площади плазменного витка $S_{пл.}$, что имеет место при уменьшении внутреннего диаметра используемой трубки.

- На рис. 1.19 подпись к рисунку не соответствует подписи оси ординат.

- Данные рис. 2.8 не совпадают с приводимыми в тексте данными: оптимальное давление при зарядном напряжении 24 кВ составляло: 3 Торр (текст диссертации), ~ 8 Торр (данные рис. 2.8).

- На рис. 2.17 представлены кривые напряжения на индукторе U_L и тока через индуктор I_L , совпадающие по фазе после пробоя. Между тем, известно, что падение напряжения на индуктивности, в данном случае U_L , должно опережать ток через индуктивность I_L на величину, равную четверти периода, что не отражено на рисунке.

- На стр. 48 текста диссертации в предложении: «Начало импульса генерации соответствует максимальному значению градиента тока разряда через индуктор dI/dt , что в свою очередь соответствует максимуму ЭДС индукции в активной среде» допущена ошибка: dI/dt – не градиент, а производная по времени.

- На стр. 75 в предложении: «При дальнейшем увеличении зарядного напряжения начинался заметный спад энергии регистрируемых импульсов излучения лазера, что, по нашему мнению, связано с неоптимальным распределением электронной температуры в разряде и преимущественному заселению других уровней неона». Вероятно, имелось в виду распределение электронов по энергиям?

- При расчете КПД индукционного лазера используется формула: $\eta_{инп} = 100\% \cdot 2 \cdot E_{las} (0,545 / C_3 \cdot U_L^2)$, где U_L – разность потенциалов на выводах индуктора. В тоже время, в тексте отмечается, что «в индукционный разряд вкладывалось 54,5% запасенной энергии системы возбуждения». Следовательно, при расчете КПД по указанной формуле вместо параметра U_L следует использовать U_{C3} , что приведет к изменению расчетного значения КПД.

- К разделу “цели диссертационной работы,” стр.6 Метод индукционной накачки к началу работ соискателя не являлся новым. Больше подходит название “альтернативный”.

- К разделу “научная новизна”, п.1, стр.7. Получение мощности 1 МВт в N_2 -лазекре не является научной новизной; п.2 и 3 сформулированы некорректно. Механизм создания инверсии в Ne и Xe не отличается от таковых при других методах накачки и именно это может быть предметом защиты.

- Нечетко и иногда некорректно изложены полученные результаты и их интерпретация. Например, на стр. 36 сказано, что установка зеркал приводит к значительному уменьшению интенсивностей большинства спектральных линий, чего в N_2 -лазере никто не наблюдал; на стр. 39 говорится о насыщении вольт-амперной характеристики тиратрона с холодным катодом, которой на самом деле нет; на стр.49 под напряжением на нагрузке U_L называется разница потенциалов на емкостях C_3 и C_4 (рис. 2.6) в момент срабатывания разрядника, которой на самом деле нет; на стр. 58 говорится об охлаждении рабочей среды при введении водорода, а в действительности охлаждается только электронный газ в послесвечении; на стр. 71 написано, что скорость дрейфа электронов играет определяющую роль в механизме формирования инверсии, что не следует из уравнений 2.3; 2.4; 2.9 и 2.10. Есть и мелкие замечания по тексту и иллюстрациям. Тем не менее, данные замечания являются скорее описками, и не снижают качества содержания и интерпретации основных результатов диссертации и не отражается на общем положительном впечатлении от работы.

В отзывах оппонентов и ведущей организации отмечается законченность научно-квалификационной работы, актуальность темы диссертации, научная новизна результатов, полученных впервые, их практическая значимость, структурированность и полнота текста. Также отмечено, что представленные замечания имеют частный характер и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. Автореферат в полной мере соответствует диссертации и отражает её содержание, соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.6 – Оптика».

На диссертацию и автореферат поступило 3 отзыва:

от профессора, д.ф.-м.н. Маслова Н.А. – Институт теоретической и прикладной механики СО РАН (ИТПМ СО РАН), к.ф.-м.н. Ямпольской С.А. – Институт сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН), к.ф.-м.н. Пинаева В. А. – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (ИТ СО РАН). Все отзывы положительные, содержат замечания, которые не влияют на высокий уровень оценки диссертационной работы. На все вопросы и замечания, содержащиеся в отзывах на автореферат диссертации, Р.А. Ткаченко были даны ответы и комментарии.

Соискатель имеет по теме диссертации 11 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Наиболее значительные работы:

1. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. MW peak power UV inductive nitrogen laser // Applied Physics B. – 2020. – V. 126. – N 6. – A.n. 104.

2. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Inductive laser on neon's atomic transitions pumped by a pulsed inductive discharge // Applied Physics B. – 2021. – V. 127. – N 11. – P. 1-6.

3. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Inductive Penning neon laser with a wavelength of 585.3 nm // Laser Physics Letters. – 2021. – V. 18. – N 9. – P. 1-6.

4. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Трунов И.А., Ткаченко Р.А. Новый неоновый лазер с длинами волн 540.1 и 614.3 нм с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – Т. 35. - № 4. – С. 261-265.

Диссертационный совет отмечает, что основными результатами, полученными в диссертации, являются:

1. Накачка лазера на электронных переходах второй положительной системы полос молекулярного азота импульсным индукционным разрядом позволила обеспечить генерацию с импульсной мощностью 1 МВт на переходах азота в области длин волн 337,1 нм и 357,7 нм.

2. Впервые предложен и экспериментально реализован новый метод возбуждения активных лазерных сред на основе инертных газов неона и ксенона – импульсным индукционным цилиндрическим и продольным разрядом.

3. В импульсном индукционном разряде добавки молекулярных газов NF_3 , SF_6 и H_2 к неону позволяют получать лазерную генерацию на переходах нейтральных атомов неона. Спектр генерации состоял из набора линий в видимом диапазоне с длинами волн 540,1; 585,3 и 614,3 нм.

4. Возможность реализации ионизационной и рекомбинационной неравновесностей, возникающих в разрядной плазме газовых активных сред на основе молекулярного азота и инертных газов неона и ксенона, накачиваемых импульсным индукционным разрядом.

5. Впервые созданы импульсные индукционные Хе(I)-лазеры в ИК области спектра на переходах нейтральных атомов ксенона с длинами волн 1,73 мкм и 2,026 мкм с малой расходимостью до 1,2 мрад и профилем пятна генерации, близким к гауссовой.

Теоретическая и практическая значимость исследований заключается в том, что:

- Описанные в работе исследования могут являться основой для создания теоретической модели импульсных безэлектродных разрядов и моделирования процессов, протекающих в неравновесной индуктивно-связанной плазме, осуществляемых на основе уравнений Максвелла, уравнения баланса электронов, атомов, положительных и отрицательных ионов, учета радиационных процессов.

- Полученные результаты могут быть использованы в целях установления кинетических реакций и процессов, протекающих в неравновесной индуктивно-связанной плазме.
- Использование импульсного индукционного разряда позволяет создавать УФ азотные лазеры на длине волны 337,1 нм с высокой пиковой мощностью на уровне 1 МВт и малой длительностью импульсов до 4 нс на полувысоте, с возможностью их применения в медицинских приложениях, в частности для лечения глаукомы и туберкулеза.
- Разработан импульсный индукционный лазер на основе активной среды инертного газа неона, генерация которого осуществляется в видимой области спектра на длинах волн 540,1; 585,3; 614,3 нм, с возможностью его применения в онкологии, дерматологии и косметологии.
- Излучение импульсных индукционных лазеров обладает высокой стабильностью от импульса к импульсу, малой расходимостью за счет физических особенностей и разрядных излучателей, возможностью изменения длительности оптических импульсов и формы лазерного пучка, а также увеличенным сроком службы.
- Представленные в данной диссертации методы увеличения эффективности формирования инверсии населенностей в импульсных индукционных лазерах, могут быть использованы для создания новых газоразрядных источников когерентного излучения.

Таким образом, в диссертации разработана научная и практическая основа для решения перспективных задач в области оптики, физики лазеров и импульсных безэлектродных разрядов, а также использования созданных лазерных установок в различных направлениях медицины.

Достоверность научных результатов и сделанных Р.А. Ткаченко выводов подтверждается систематическим и комплексным характером исследований, тщательным анализом и многократной воспроизводимостью основных зависимостей, проведением экспериментов с использованием современных методик измерений, а также совпадением полученных Р.А. Ткаченко данных с результатами других работ, где такое сравнение было возможно.

Личный вклад соискателя. Представленные в данной диссертации результаты получены Р.А. Ткаченко лично либо при его прямом участии. В процессе работы соискатель занимался созданием высоковольтных систем возбуждения, проводил экспериментальные исследования лазерных характеристик излучения, участвовал в обсуждении полученных результатов, подготавливал к публикации научные статьи в отечественных и зарубежных журналах, выступал с докладами на Российских и международных конференциях.

Из 21 человек, входящих в состав диссертационного совета, на защите присутствовали, очно и в удаленном интерактивном режимах, 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации. Дополнительно введенных членов на разовую защиту не было.

При проведении тайного голосования с использованием информационных технологий проголосовали: За - 17, против - нет. Диссертационный совет утвердил протокол о результатах голосования.

На заседании 06.09.2024 г. диссертационный совет принял решение присудить Ткаченко Роману Андреевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности «1.3.6. – Оптика».

Зам. председателя диссертационного совета 24.1.070.01,

д.ф.-м.н.

Тайченачев Алексей Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета,

д.ф.-м.н.



Прудников Олег Николаевич

6 сентября 2024 г.