

На правах рукописи



Ткаченко Роман Андреевич

**ИМПУЛЬСНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ПЕРЕХОДАХ
МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА И НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ
НЕОНА И КСЕНОНА**

Специальность: 1.3.6 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в лаборатории Импульсных газоразрядных лазеров «Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук».

Научный руководитель: **Ражев Александр Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория импульсных газоразрядных лазеров, главный научный сотрудник, профессор по специальности «Лазерная физика»

Официальные оппоненты: **Ломаев Михаил Иванович**
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория оптических излучений, ведущий научный сотрудник

Бохан Петр Артемович
доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория мощных газовых лазеров, главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Защита состоится «6» сентября 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.070.01, созданного на базе Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 63003, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева 15Б.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института лазерной физики СО РАН <http://www.laser.nsc.ru/>

Автореферат разослан «__» ____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



О.Н. Прудников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Представленная диссертация содержит результаты научных исследований, полученных автором в период с 2017 по 2023 гг. в Институте лазерной физики Сибирского отделения РАН.

Актуальность работы

Газовые лазеры, активной средой которых является нейтральный или ионизированный газ, привлекли к себе огромное внимание благодаря особым свойствам генерируемого ими излучения, характеризующегося высокой временной и пространственной когерентностью, монохроматичностью и направленностью, а также стабильностью работы как в непрерывном, так и в импульсном режиме.

Типичными и широко известными представителями газовых активных сред являются молекулярный азот, а также инертные газы неон и ксенон, генерация на которых возможна в ультрафиолетовой (УФ), видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра. Особая популярность данных источников вызвана их применением в различных медицинских приложениях благодаря селективному характеру лазерного излучения, проявляющемуся при его воздействии на биологические ткани. Одними из таких приложений являются эндовакитарная методика лечения туберкулеза, а также методы спектрально-флуоресцентной диагностики биотканей, проводимых УФ лазерным излучением азотного лазера с длиной волны 337,1 нм [1].

Другими медицинскими направлениями являются дерматология, онкология и косметология, занимающиеся вопросами удаления злокачественных и доброкачественных новообразований и опухолей, удаления доставляющих неудобства образований на коже (папилломы, винные пятна), лазерной шлифовки, омоложения кожи и так далее [2]. Активное использование новых лазерных технологий в перечисленных областях медицины вызвано постоянным ростом числа пациентов с диагнозами болезней кожи и подкожной клетчатки, термических и химических ожогов, а также пациентов, нуждающихся в послеоперационных восстановительных процедурах из-за возможности образования гипертрофических рубцов, возникающих в 35 % случаев после операций и до 80 % послеожоговых травм [3, 4].

Особое внимание привлекли к себе лазеры жёлтой области спектра (550 – 590 нм). Их преимуществами являются: повышенный показатель поглощения оксигемоглобина по сравнению с широко известными твердотельными лазерами на длинах волн 532 и 633 нм [5-8], малое рассеивание лазерного луча при прохождении преломляющих сред глаза, высокая

эффективность воздействия при процедурах коагуляции васкуляризированных структур, сниженные болевые ощущения пациентов и так далее [9]. Эффективность и безопасность «жёлтых лазеров» продемонстрирована при лечении широкого круга заболеваний, таких как макулярный отек, посттромботическая ретинопатия, центральная серозная хориоретинопатия [10].

Помимо медицинских приложений, излучение ИК области спектра газовых лазеров может применяться для проведения мониторинга атмосферы, диагностики повреждений газопроводов и нефтепроводов, активных тепловизионных систем, а также беспроводной наземной и космической связи. Одним из перспективных методов обнаружения загрязнений выделенных участков неба является лазерный дистанционный мониторинг, проводимый в ближнем и среднем ИК диапазоне длин волн (от 0,9 до 14 мкм). Данная область оптического спектра уникальна благодаря тому, что в ней расположены окна прозрачности земной атмосферы, некоторые из которых сосредоточены в следующих диапазонах: 0,7...1,4 мкм; 1,5...1,8 мкм; 2...2,4 мкм; 3,4...4,2 мкм; 4,5...5 мкм; 8...14 мкм [11]. Более того, в среднем ИК диапазоне лежат линии поглощения колебательных переходов различных молекул загрязнителей, содержащих С-Н, С-Н и N-О связи, что даёт возможность их удаленного детектирования по спектрам поглощения и рассеяния. Кроме того, излучение среднего ИК диапазона, попадающее в окна прозрачности, менее подвержено рассеянию (в пределах окон прозрачности атмосферы), чем излучения видимого или УФ диапазонов, что даёт возможность его применения для создания оптических наземных систем связи [12].

Отдельным типом газоразрядных лазеров, получившим наибольшее распространение, являются лазеры с накачкой электрическим разрядом, в которых возбуждение активной среды происходит благодаря протеканию электрического тока между электродами, расположенными внутри разрядной камеры. Использование такого метода накачки с первых дней лазерной эпохи стало весьма популярным благодаря тому, что такие лазерные системы были относительно простыми с физической и инженерной точек зрения, обладали малыми габаритами, являлись достаточно безопасными и удобными. Особую популярность и распространение данный метод накачки начал приобретать в начале 70-х годов XX века благодаря отличным характеристикам лазерного излучения и эффективности работы, полученной при возбуждении газовых смесей высокого давления (несколько атмосфер) поперечным разрядом [13].

Тем не менее, данный тип накачки обладает рядом недостатков. Ключевым из них является расположение металлических электродов в прямом контакте с активной средой. Протекание высокоточного объемного электрического разряда приводит к постепенному

разрушению электродов, происходящему в результате формирования стримеров и катодных пятен – особых дефектов, приводящих к деформации их рабочей поверхности. В результате этого на электродах появляются потенциально выделенные места и неоднородности протекании электрического разряда, приводящие к неравномерности возбуждения активной среды и, как следствие, к увеличению нестабильности работы лазера и ухудшению его энергетических и пространственных характеристик. Совместно с этим происходит распыление материала катода и анода, что является причиной загрязнения газовых компонент и элементов резонатора. Наличие перечисленных недостатков, свойственных большинству газоразрядных лазеров, ограничивает возможности применений лазеров с накачкой электрическим разрядом.

В связи с этим актуальным является поиск новых методов возбуждения активных газовых лазерных сред. Одним из таких методов является индукционный разряд, формирующийся благодаря индукции электромагнитного поля при протекании переменного электрического тока по индуктору, не имеющему прямого контакта с активной лазерной средой. За счет отсутствия электродов индукционный разряд обладает рядом преимуществ по сравнению с газовыми лазерами с электрической накачкой, такими как возможность получения больших объемов «чистой» газоразрядной плазмы, повышенный ресурс работы, высокий уровень энерговклада и другие. Отличительной чертой таких лазеров является высокая стабильность амплитуды лазерного излучения от импульса к импульсу, необходимая для медицинских приложений, в которых процедуры с использованием лазерного излучения занимают длительное время.

Другой особенностью индукционных лазеров является малая расходимость излучения, обусловленная формой пучка генерации. Обычно данная величина не превышает долей миллирадиан, что близко к фундаментальному дифракционному пределу. Малая расходимость позволяет достигать предельно малых размеров сфокусированного пятна, что очень важно, к примеру, в микроэлектронике для формирования узких каналов при создании элементов микросхем.

Цель диссертационной работы

Использование импульсного индукционного разряда как нового метода возбуждения газоразрядных лазеров на переходах молекул азота и нейтральных атомов неона и ксенона.

Задачи диссертационной работы

1. Создание высоковольтных систем возбуждения для формирования импульсного индукционного разряда в активных средах на основе молекулярного азота и инертных газов неона и ксенона.
2. Поиск оптимальных условий накачки для достижения эффективного режима лазерной генерации на электронных переходах молекулярного азота и нейтральных атомов неона и ксенона.
3. Поиск оптимальных составов активных газовых сред на основе азота, неона и ксенона, возбуждаемых импульсным индукционным разрядом.
4. Исследование спектральных, временных, пространственных и энергетических характеристик спонтанного и вынужденного излучения импульсного индукционного разряда в молекулярном азоте, неоне и ксеноне.
5. Установление основных механизмов формирования инверсии населенностей на $3p \rightarrow 3s$ переходах нейтральных атомов неона в импульсном индукционном разряде на основе временного поведения оптических импульсов, а также УФ излучения индукционного азотного лазера.

Научная новизна

В настоящей диссертации впервые были получены следующие научные результаты:

1. При накачке активной среды молекулярного азота импульсным индукционным разрядом достигнута мощность излучения 1 МВт.
2. Экспериментально реализовано возбуждение инертных активных сред на основе неона и ксенона импульсным индукционным разрядом.
3. При возбуждении активной среды неона и ксенона импульсным индукционным разрядом получена лазерная генерация на длинах волн $\lambda_1 = 540,1$ нм; $\lambda_2 = 585,3$ нм; $\lambda_3 = 614,3$ нм, соответствующих $3p \rightarrow 3s$ переходам Ne(I), а также $\lambda_4 = 904,5$ нм; $\lambda_5 = 1,73$ мкм; $\lambda_6 = 2,026$ мкм на $6p \rightarrow 6s$ и $5d \rightarrow 6p$ переходах Xe(I).
4. Показано различие механизмов формирования инверсии населенностей между электронными переходами нейтральных атомов неона с длинами волн $\lambda_1 = 540,1$ нм; $\lambda_2 = 585,3$ нм; $\lambda_3 = 614,3$ нм, возбуждаемых импульсным индукционным разрядом.

Практическая значимость

1. Представленные в данной диссертационной работе методы увеличения эффективности формирования инверсии населенностей в импульсных индукционных лазерах могут быть использованы для создания новых газоразрядных источников когерентного излучения.
2. Показано, что использование импульсного индукционного разряда позволяет создавать УФ азотные лазеры с высокой пиковой мощностью и малой длительностью импульсов с возможностью применения в медицинских приложениях, в частности для лечения глаукомы и туберкулеза.
3. Разработан импульсный индукционный лазер на основе активной среды неона с возможностью его применения в онкологии, дерматологии и косметологии.
4. Полученные результаты могут быть использованы в целях установления кинетических реакций и процессов, протекающих в неравновесной индуктивно связанной плазме, а также для создания теоретических моделей импульсных индукционных лазеров.

Защищаемые положения

1. Импульсный индукционный разряд является эффективным методом возбуждения N_2 -лазера, позволяющим достигать импульсной мощности 1 МВт на электронных переходах молекул азота с длинами волн 337,1 нм и 357,7 нм.
2. Механизмом формирования инверсии населенностей Ne(I)-лазера с излучением на $\lambda_1 = 540,1$ нм и $\lambda_3 = 614,3$ нм при накачке импульсным индукционным разрядом является прямое возбуждение электронным ударом из основного состояния.
3. Лазерная генерация на переходах нейтральных атомов неона с $\lambda_2 = 585,3$ нм при накачке импульсным индукционным разрядом формируется в рекомбинирующей плазме; опустошение нижнего лазерного уровня осуществляется в реакциях Пеннинга в присутствии водорода.
4. Возбуждение активных сред на основе неона и ксенона импульсным индукционным разрядом позволяет получать лазерную генерацию на переходах неона на длинах волн $\lambda_1 = 540,1$ нм, $\lambda_2 = 585,3$ нм и $\lambda_3 = 614,3$ нм, а также на переходах ксенона с длинами волн $\lambda_4 = 904,5$ нм, $\lambda_5 = 1,73$ мкм и $\lambda_6 = 2,026$ мкм.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Международных научных студенческих конференциях «МНСК»

(Новосибирск, 2017, 2018, 2019); Международных конференциях по импульсным лазерам и применениям лазеров «AMPL» (Томск, 2017, 2019, 2021); Международном симпозиуме по проблемам лазерной физики «Modern problems of laser physics (MPLP)» (Новосибирск, 2019); 25-ой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых «ВНКСФ 2019» (Симферополь, 2019); Международных конференциях по лазерной оптике «International Conference Laser Optics (ICLO)» (Санкт-Петербург, 2020, 2022).

Соискатель Ткаченко Р.А. в 2022 г. являлся руководителем совместного проекта Новосибирской области и РФФИ № 20-42-543005 по конкурсу р_мол_а_Новосибирск «Новый неоновый лазер с накачкой импульсным индукционным разрядом».

Личный вклад автора

Представленные в данной диссертации результаты получены автором лично либо при его прямом участии. В процессе работы соискатель занимался разработкой и созданием высоковольтных систем возбуждения различных конфигураций, проводил экспериментальные исследования лазерных характеристик излучения, занимался обработкой и анализом полученных результатов, участвовал в их обсуждении, подготавливал к публикации научные статьи в российских и зарубежных журналах, выступал с постерными и устными докладами на российских и международных конференциях.

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 26 научных работах, 11 из которых изданы в журналах, включенных в перечень ВАК и входящих в базы данных WoS и Scopus, 15 – в трудах конференций.

Структура диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения. Диссертация содержит 116 страницы машинописного текста, включая 65 рисунков и список цитируемой литературы из 130 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования. Описана научная и практическая значимость полученных

результатов. Перечислены основные положения диссертации, выносимые на защиту. Обозначен личный вклад автора и его публикации, а также структура и объем диссертации.

Первая глава посвящена особенностям и преимуществам импульсного индукционного разряда как метода накачки активных газовых лазерных сред, а также описанию методики проведения исследований и используемой измерительной аппаратуры. В §1.1 кратко представлены особенности безэлектродных разрядов. В §1.2 описаны типы индукционных разрядов и представлено теоретическое рассмотрение индукционного разряда в формализме трансформаторной модели. В качестве первичной обмотки такого трансформатора выступает расположенный на лазерном излучателе индуктор, а вторичная обмотка образована короткозамкнутым плазменным витком индукционного разряда. В §1.3 рассмотрены основные схемы возбуждения активных газовых сред импульсным индукционным разрядом, а также методы оптимизации их работы, основанные на согласовании колебательных процессов смежных контуров высоковольтных систем возбуждения. В §1.4 описаны используемые для формирования импульсных индукционных разрядов лазерные излучатели в виде цилиндрических керамических трубок, а также трубок-капилляров с различными геометрическими параметрами, особенности их конструкций. Цилиндрические трубки имели длину 80 см с внутренним диаметром от 22 до 42 мм. Индуктор был представлен набором параллельно подключаемых секций, выполненных из многожильного провода либо медных шин. Трубки капилляры имели от одного до трех обводных каналов с общей длиной от 40 до 80 см. Внутренний диаметр капилляра изменялся от одного до нескольких миллиметров. Описано пространственное распределение напряженностей электрических и магнитных полей в зависимости от вида индукционного разряда. §1.5 представлен обзор научных работ по использованию безэлектродного разряда как метода накачки лазеров импульсного и непрерывного действия. На примере научных статей показано, что индукционный разряд позволяет накачивать лазерные среды на основе атомов и молекул различных газов. В §1.6 обсуждены применяемые в работе измерительные приборы и свойственные им особенности, а также рассмотрена методика проведения исследований.

Вторая глава посвящена созданию и исследованию УФ азотного лазера с накачкой импульсным индукционным разрядом, а также обзору и анализу опубликованных научных работ, касающихся условий возбуждения активных газовых лазерных сред на основе молекулярного азота, накачиваемого объемным сильноточным импульсным электрическим разрядом продольного и поперечного типа. В §2.1 рассмотрены особенности молекулярного азота как активной лазерной среды, описаны процессы и реакции, протекающие в азотной разрядной плазме. Из сделанного обзора следует, что основным механизмом формирования

инверсии населенностей на переходах $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ 2^+ системы полос молекул азота при накачке продольным и поперечным электрическим разрядом является прямое возбуждение электронным ударом из основного состояния $X^1\Sigma_g^+$. Анализ статей и главных механизмов формирования инверсии показал, что увеличение эффективности работы N_2 -лазеров с накачкой электрическим разрядом возможно за счет увеличения скорости возбуждения состояния $C^3\Pi_u$. В §2.2 представлено краткое описание результатов предшествующих работ, посвященных возбуждению активных сред молекулярного азота импульсным индукционным разрядом, выполненных научной группой лаборатории 2.1 Импульсных газоразрядных лазеров ИЛФ СО РАН. Максимальная энергия излучения на длинах волн 337,1 и 357,7 нм равнялась 4,5 мДж при длительности оптических импульсов 15 нс на полувысоте. Импульсная мощность излучения достигала 300 кВт. С целью увеличения мощности накачки азота импульсным индукционным разрядом в §2.3 предложена совмещенная схема возбуждения, выполненная на основе схемы Блюмляйна и LC-инвертора (рисунок 1).

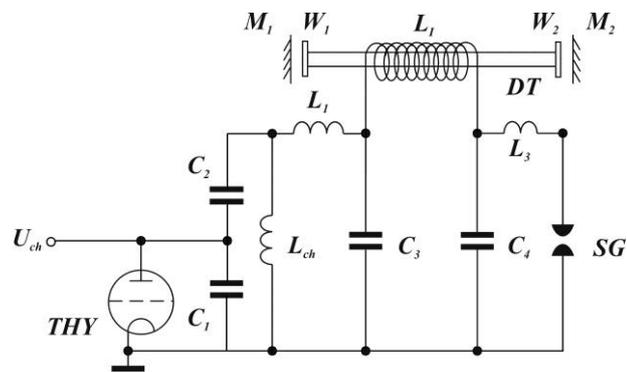


Рисунок 1 – Электрическая схема системы возбуждения индукционного азотного лазера

Впервые показана возможность достижения высокого уровня энергии генерации данного лазера до 11 мДж за счет увеличения скорости накачки состояния $C^3\Pi_u$ молекулярного азота, а также увеличения активного объема индукционного излучателя. В §2.4 получено, что спектральный состав спонтанного излучения импульсного индукционного N_2 -лазера преимущественно представлен набором линий в диапазоне от 300 до 450 нм, соответствующих 2^+ и 1^- системе полос молекулярного азота и молекулярного иона азота. Показано, что в результате описанных экспериментальных исследований по накачке активной среды молекулярного азота импульсным индукционным разрядом достигается лазерная генерация на переходах $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ с длинами волн 337,1 и 357,7 нм. (Рис. 2).

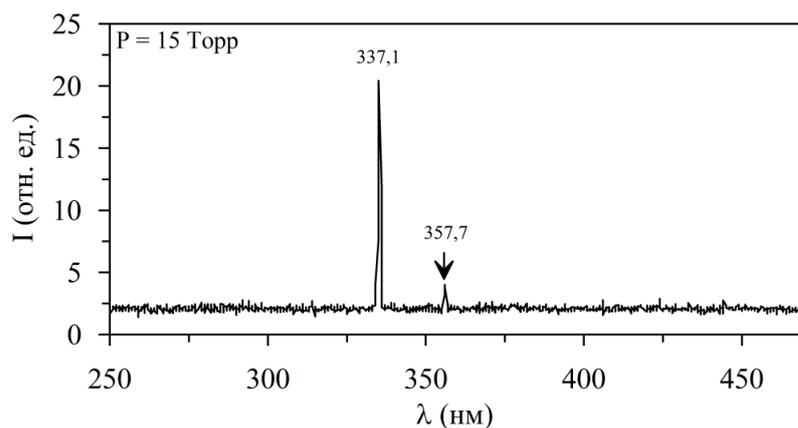


Рисунок 2 – Спектр излучения азота в импульсном индукционном разряде при давлении 15 Торр

Оптические импульсы излучения при пониженных давлениях и энергии генерации 4...6 мДж имели колоколообразный вид с длительностью (5 ± 1) нс на полувысоте. В оптимальных условиях с энергией генерации 11 мДж длительность оптических импульсов достигала (10 ± 1) нс на полувысоте. Впервые достигнутая рекордная пиковая мощность излучения 1 МВт в импульсах длительностью 4...11 нс на полувысоте на соответствующих переходах азота при накачке импульсным индукционным разрядом. В §2.5 произведена оценка эффективности работы импульсного индукционного азотного лазера на основе КПД, вычисленного от доли вложенной энергии системы возбуждения в индукционный разряд. Показано, что индукционный разряд является эффективным методом накачки активной среды молекулярного азота на основе произведенной оценки КПД от вложенной энергии, достигающего значения 0,43 % (Рис. 3).

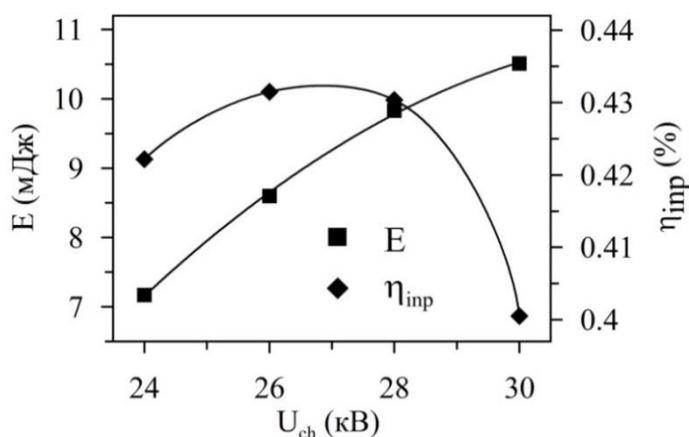


Рисунок 3 – Зависимость энергии генерации E и КПД от вложенной энергии η_{imp} УФ индукционного азотного лазера от зарядного напряжения U_{ch}

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию спектральных, энергетических, временных и пространственных характеристик излучения нейтральных атомов инертного газа неона. В §3.1 рассмотрены особенности активных сред на основе

инертного газа неона, накачиваемого объемным электрическим разрядом. Показано, что заселение верхних лазерных уровней на $3p-3s$ переходах неона происходит как в результате прямого электронного удара, так и благодаря рекомбинационным процессам. Обсуждены особенности ионизационной и рекомбинационной неравновесности электроразрядной плазмы. В §3.2 представлены результаты экспериментальных исследования спектральных и энергетических характеристик излучения импульсного индукционного NeI-лазера в совмещенной схеме системы возбуждения. В качестве активных сред использовался неон и его смеси с различными газами, в частности NF_3 и SF_6 . Впервые при накачке неона импульсным индукционным разрядом получена лазерная генерация на длинах волн 540,1 и 614,3 нм при давлениях активной среды на уровне 15 и 0,1 Торр, соответственно. Максимальная интенсивность излучения данных линий достигалась в смесях Ne: NF_3 – (250-500):1 при давлениях двухкомпонентных смесей на уровне 15 и 0,5 Торр, соответственно. Излучение на длине волны 585,3 нм при накачке импульсным индукционным разрядом получено только при наличии Пеннингговской добавки в виде молекулярного водорода. Максимальная энергия генерации около 140 мкДж на длине волны 585,3 нм была достигнута при соотношении Ne: H_2 = 1:2 при работе лазера в импульсно-периодическом режиме при частоте повторения импульсов 10 Гц. Длительность оптических импульсов излучения в данном случае в среднем равнялась 200 нс на полувысоте, что соответствует импульсной мощности 700 Вт. Полученные характеристики генерации оказались на уровне максимальных результатов, достигнутых в электрическом разряде. В §3.3 представлены результаты исследования временных характеристик излучения неона и обсуждены основные механизмы формирования инверсии населенностей. Длительность оптических импульсов излучения с $\lambda = 540,1$ нм и 614,3 нм составляла (15 ± 2) нс и (5 ± 1) нс на полувысоте. Оптический импульс генерации на длине волны 540,1 нм мог состоять из двух пиков, максимумы которых были разнесены во времени на 7...8 нс. Показана задержка появления генерации на длине волны 614,3 нм относительно 540,1 нм, величина которой в среднем составляла 8 нс. Генерация на обеих длинах волн происходит практически в одно и то же время, соответствующее максимуму ЭДС индукции, определяющей момент зажигания индукционного разряда. На примере сравнения с индукционным азотным лазером показано, что основным механизмом формирования инверсии на $3p \rightarrow 3s$ переходах неона с длинами волн 540,1 и 614,3 нм при накачке импульсным индукционным разрядом является прямое возбуждение электронным ударом из основного состояния. Временная задержка появления излучения неона на длине волны 585,3 нм от генерации УФ азотного индукционного лазера составляла 30 нс, что говорит о рекомбинационном характере протекающих процессов (Рис. 4).

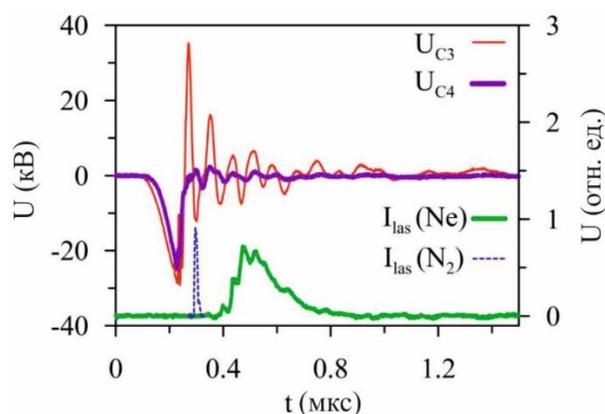


Рисунок 4 – Осциллограммы напряжений на емкостях разрядного контура U_{C3} и U_{C4} , а также генерации на азоте $I_{las}(N_2)$ с длиной волны 337,1 нм и генерации на неоне $I_{las}(Ne)$ с длиной волны 585,3 нм

В §3.4 представлены результаты исследования пространственных особенностей генерации импульсных индукционных NeI-лазеров. Лазерный пучок имел форму кольца с диаметром, близким к внутреннему диаметру разрядной трубки, определяемому характером распределения напряженности электрического поля в импульсном индукционном цилиндрическом разряде. Расходимость излучения не превышала 2 мрад. В §3.5 проведены исследования влияния добротности оптического резонатора на характеристики излучения индукционных неоновых лазеров. Показано, что применение плотного резонатора позволяет изменить форму лазерного пятна в дальней зоне с кольцевой на круговую и получить распределение интенсивности, близкое к однородному (Рис. 5).

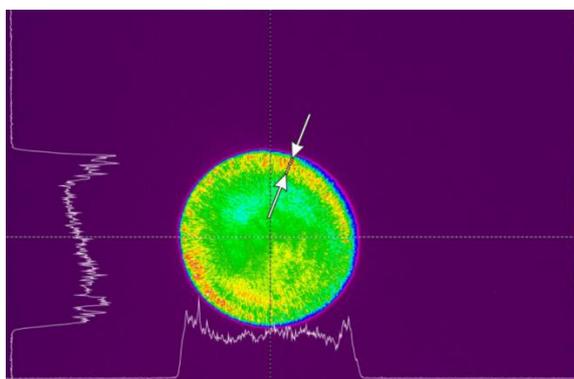


Рисунок 5 – Поперечный профиль лазерного пучка в резонаторе, образованном плоскими диэлектрическими зеркалами с коэффициентом отражения переднего около 90 %

В §3.6 рассмотрены особенности излучения индукционного неоновых лазера на длине волны 540,1 нм, носящего характер сверхсветимости. Показано наличие неоднородностей интенсивности излучения по сечению кольца генерации с ярко выраженной зернистой структурой, наблюдающейся в лазерах с высоким коэффициентом усиления, работающих в режиме усиленного спонтанного шума. Зернистая структура пятна генерации проявляет стохастический характер и не повторяется от импульса к импульсу.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию характеристик излучения нейтральных атомов инертного газа ксенона. В §4.1 выполнен обзор научных статей, направленных на исследование ИК электроразрядных ХеI-лазеров. Кратко рассмотрены способы увеличения эффективности возбуждения ксенона, осуществляемой за счет использования добавок буферных газов. Показано, что инверсия населенностей на переходах ксенона возникает в результате прямого электронного удара. В §4.2 представлены результаты работ по накачке ксенона импульсным индукционным разрядом в цилиндрической трубке и трубке-капилляре. Впервые при накачке ксенона импульсным индукционным продольным разрядом получена лазерная генерация на длинах волн 1,73 и 2,026 мкм при давлении около 0,3 Торр. Проведены экспериментальные исследования влияния состава активной газовой среды на интенсивность излучения атомов ксенона. В качестве добавок использовались гелий и аргон, приводившие к уменьшению интенсивности излучения ксенона. При возбуждении ксенона низкого давления (~0,1 Торр) цилиндрическим индукционным разрядом спектр генерации состоял из линий на длинах волн 1,73 и 2,026 мкм, а также 904,5 нм. Энергия излучения не превышала 0,1 мДж. Длительность оптических импульсов в индукционном излучателе в виде трубки-капилляра составляла (60 ± 2) нс, однако в трубке цилиндрического типа данная величина не превышала 9 нс на полувысоте. Расходимость излучения импульсного индукционного ИК Хе(I)-лазера достигала $(1 \pm 0,2)$ мрад, а профиль пятна генерации при установке полуконфокального резонатора имел вид, близкий к гауссовому.

В **Заключении** представлены основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Накачка лазера на электронных переходах $C^3P_u \rightarrow B^3P_g 2^+$ системы полос молекулярного азота импульсным индукционным разрядом позволила обеспечить генерацию с импульсной мощностью 1 МВт на переходах азота с длинами волн 337,1 нм и 357,7 нм.
2. Показано, что в результате увеличения мощности накачки УФ индукционного азотного лазера происходит изменение формы оптических импульсов, представленной двумя выраженными пиками схожей интенсивности. Длительность импульсов излучения изменялась от (5 ± 1) нс до (10 ± 1) нс на полувысоте при изменении давления активной среды с 4,5 до 7,5 Торр и зарядного напряжения с 24 до 30 кВ.
3. Впервые предложен и экспериментально реализован новый метод возбуждения активных лазерных сред на основе инертных газов неона и ксенона – импульсный индукционный цилиндрический и продольный разряд.

4. Обнаружено, что в импульсном индукционном разряде добавки молекулярных газов NF_3 , SF_6 и H_2 к Ne позволяют получать лазерную генерацию на переходах нейтральных атомов неона. Показано, что спектр генерации состоял из набора линий в видимом диапазоне с длинами волн $\lambda_1 = 540,1$ нм; $\lambda_2 = 585,3$ нм и $\lambda_3 = 614,3$ нм.
5. Исследованы временные характеристики генерации импульсного индукционного Ne(I) -лазера. Длительность импульсов излучения в активной среде чистого неона на $\lambda_1 = 540,1$ нм и $\lambda_3 = 614,3$ нм достигала (15 ± 2) нс и (5 ± 1) нс на полувысоте, соответственно. Импульсы генерации с $\lambda_1 = 540,1$ нм могли иметь двухпиковую структуру с разным распределением интенсивности. Оптические импульсы излучения на $\lambda_2 = 585,3$ нм в активной среде Ne-H_2 обладали большей длительностью около 180 нс на полувысоте.
6. Показано, что начало генерации на длинах волн 540,1 нм и 614,3 нм индукционного Ne(I) -лазера совпадает с появлением излучения УФ индукционного N_2 -лазера. Обнаружено, что начало генерации на 585,3 нм отставало от 540,1 нм и 614,3 нм в среднем на 40...50 нс.
7. Исследованы и обоснованы особенности пространственных характеристик генерации индукционного Ne(I) -лазера. В оптимальном режиме работы лазерные пучки имели форму кольца с размерами, близкими к внутреннему диаметру индукционных излучателей. Неоднородности в поперечном сечении пучка имели зернистую структуру, свойственную лазерам с высоким коэффициентом усиления, работающим в режиме усиленного спонтанного шума.
8. Продемонстрирована возможность получения пучка генерации с близким к равномерному распределению интенсивности излучения в поперечном сечении при помощи изменения добротности оптического резонатора.
9. Впервые созданы импульсные индукционные лазеры в ИК области спектра на переходах нейтральных атомов ксенона с длинами волн 1,73 мкм и 2,026 мкм. Исследовано влияние добавок буферных газов гелия и аргона на интенсивность излучения Xe(I) -лазера. Получена энергия излучения 0,1 мДж с длительностью импульсов от $(6...8 \pm 1)$ нс до (60 ± 2) нс на полувысоте. Расходимость излучения импульсного индукционного ИК Xe(I) -лазера достигала $(1 \pm 0,2)$ мрад, а профиль пятна генерации при установке полуконфокального резонатора имел вид, близкий к гауссовому.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А. Компактный УФ азотный лазер с накачкой импульсным продольным индукционным разрядом // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31. – № 3. – С. 182-185.
2. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А. Импульсный индукционный ИК Ar I-лазер // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 3. – С. 169-172.
3. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А. УФ индукционный азотный лазер с импульсной мощностью 600 кВт // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 7. – С. 965-968.
4. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Каргапольцев Е.С., Ткаченко Р.А., Трунов И.А. ИК индукционный Хе-лазер с накачкой импульсным продольным индукционным разрядом // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. – Т. 84. – № 7. – С. 944-947.
5. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Ткаченко Р.А. Индукционный азотный лазер с импульсной мощностью 1 МВт // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 3. – С. 188-191.
6. 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.
7. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Каргапольцев Е.С., Трунов И.А., Ткаченко Р.А. ИК ХеI-лазер с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом // Оптика атмосферы и океана. – 2020. – Т. 33. – № 3. – С. 173-176.
8. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Inductive Penning plasma neon laser with a wavelength of 585.3 nm // Laser Physics Letters. – 2021. – V. 18 – N 9. – P. 1-6.
9. 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.
10. Ражев А.М., Чуркин Д.С., Трунов И.А., Ткаченко Р.А. 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.
11. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Neon lasing ($\lambda = 540.1$ nm) in a dense optical cavity pumped by a pulsed inductive cylindrical discharge // Laser Physics. – 2023. – V. 33. – N 2. – P. 1-5.

Публикации в трудах конференций:

1. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Compact UV nitrogen laser pumped by a pulsed longitudinal inductive discharge / In: Abstracts of XIII International Conference on pulsed lasers and laser applications AMPL-2017. – Tomsk. – 2017. – P. 29.
2. Ткаченко Р.А. Влияние условий накачки на интенсивность излучения эксимерных молекул XeF^* в импульсном индукционном разряде / В сб.: Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции, секция «Фотоника и квантовые оптические технологии». – Новосибирск. – 2017. – С. 33.
3. Ткаченко Р.А., Трунов И.А. Вынужденное излучение атомов XeI в области 904 нм – 980 нм при накачке импульсным индукционным продольным разрядом трансформаторного типа / В сб.: Материалы 56-й Международной научной студенческой конференции, секция «Фотоника и квантовые оптические технологии». – Новосибирск. – 2018. – С. 27.
4. Razhev A.M., Churkin D.S., Kargapol'tsev E.S., Tkachenko R.A., Trunov I.A. IR inductive Xe laser pumped by a pulsed longitudinal inductive discharge of the transformer type / In: The VIII International Symposium «Modern problems of laser physics». – Новосибирск. – 2018. – С. 118-119.
5. Ткаченко Р.А. Индукционный азотный лазер с длиной активной среды 1,3 м / В сб.: Материалы 56-й Международной научной студенческой конференции, секция «Фотоника и квантовые оптические технологии». – Новосибирск. – 2018. – С. 28.
6. Ткаченко Р.А., Трунов И.А. Импульсный индукционный Ar I лазер / В сб.: Материалы 57-й международной научной студенческой конференции, секция «Фотоника и квантовые оптические технологии». – Новосибирск. – 2019. – С. 26.
7. Трунов И.А., Ткаченко Р.А. Исследование спектральных характеристик генерации Xe I лазера с накачкой импульсным индукционным цилиндрическим разрядом / В сб.: Материалы 57-й международной научной студенческой конференции, секция «Фотоника и квантовые оптические технологии». – Новосибирск. – 2019. – С. 27.
8. Ткаченко Р.А., Ражев А.М., Трунов И.А., Чуркин Д.С. Исследование характеристик излучения импульсного индукционного Ar I лазера / В сб.: Материалы 25-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, секция «Квантовая электроника». – Севастополь. – 2019. – С. 270.
9. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Pulsed inductive IR Ar I laser / In: Abstracts of XIV International Conference on pulsed lasers and laser applications AMPL-2019. – Tomsk. – 2019. – P. 37.

10. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Pulsed inductive nitrogen laser with pulse power 1 MW / In: Abstracts of XIV International Conference on pulsed lasers and laser applications AMPL-2019. – Tomsk. – 2019. – P. 37.
11. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. IR Ar I laser pumped by a pulsed inductive discharge / In: Proceedings of 19th International Conference Laser Optics ICLO-2020. – Saint-Petersburg. – 2020. – P. 15.
12. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. UV high-power inductive N₂ laser / In: Proceedings of 19th International Conference Laser Optics ICLO-2020. – Saint-Petersburg. – 2020. – P. 75.
13. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. New neon laser pumped by a pulsed inductive discharge / In: Abstracts of XV International Conference on pulsed lasers and laser applications AMPL-2021. – Tomsk. – 2021. – P. 39.
14. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Penning laser on neutral neon atoms' transitions with lasing on $\lambda = 585.3$ nm / In: Abstracts of XV International Conference on pulsed lasers and laser applications AMPL-2021. – Tomsk. – 2021. – P. 43.
15. Razhev A.M., Churkin D.S., Tkachenko R.A. Pulsed inductive Ne I laser / In: Proceedings of 20th International Conference Laser Optics ICLO-2022. – Saint-Petersburg. – 2022. – P. 133.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Кононов В.И. Фундаментальные достижения оптики и лазерной физики для медицины // Вестник Российской академии наук. – 2004. – Т. 74. – № 2. – С. 99-124.
2. Шахно Е.А. Физические основы применения лазеров в медицине / СПб: НИУ ИТМО. – 2012. – С. 129.
3. Агеева Л.И., Александрова Г.А., Зайченко Н.М. и др. Здоровоохранение в России. 2019. / М.: Стат. сб. / Росстат. – 2019. – С. 170.
4. Kafka M., Collins V., Kamolz L.-P. et al. Evidence of invasive and non-invasive treatment modalities for hypertrophic scars: A systematic review // Wound Repair and Regeneration. – 2017. – V. 25. – N 1. – P. 139-144.
5. Özmert E., Demirel S., Yanık Ö. et al. Low-fluence photodynamic therapy versus subthreshold micropulse yellow wavelength laser in the treatment of chronic central serous chorioretinopathy // Journal of Ophthalmology. – 2017. – V. 2016. – N 1. – P. 1-8.
6. Kapoor V., Karpov V., Linton C. et al. Solid state yellow and orange lasers for flow cytometry // Cytometry Part A. – 2008. – V. 73A. – N 6. – P. 570-577.

7. Kapoor V., Subach F.V., Kozlov V.G. et al. New lasers for flow cytometry: filling the gaps // *Nature Methods*. – 2007. – V. 4. – N 9. – P. 678-679.
8. Telford W.G., Hawley T., Subach F. et al. Flow cytometry of fluorescent proteins // *Methods*. – 2012. – V. 57. – N 3. – P. 318-330.
9. Adam M.K., Weinstock B.M., Sundeep K.K. et al. Patient comfort with yellow (577 nm) vs. green (532 nm) laser panretinal photocoagulation for proliferative diabetic retinopathy // *Ophthalmol Retina*. – 2018. – V. 2. – N 2. – P. 91-95.
10. Gosteva K.E. and Gosteva N.N. Laser treatment of central serous chorioretinopathy // *Laser Medicine*. – 2021. – V. 25. – N 3S. – P. 70.
11. Шалькевич Ф.Е. Методы аэрокосмических исследований / Минск: БГУ. – 2005. – С. 161.
12. Чандра А.М., Гош С.К. Дистанционное зондирование и географические системы / М.: Техносфера. – 2008. – С. 312.
13. Wood O.R., Burkhardt E.G., Pollack M.A., Bridges T.J. High-pressure laser action in 13 gases with transverse excitation // *Appl. Phys. Lett.* – 1971. – V. 18. – N 4. P. 112-115.