

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургский  
государственный университет



С. В. Микушев

2024 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», на диссертацию **Ткаченко Романа Андреевича** «Импульсные газоразрядные индукционные лазеры на переходах молекулярного азота и нейтральных атомов неона и ксенона», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — «Оптика»

Диссертационная работа Ткаченко Романа Андреевича посвящена исследованию возможности использования импульсного индукционного разряда как нового метода возбуждения газоразрядных лазеров на переходах молекул азота и нейтральных атомов неона и ксенона.

#### Актуальность темы диссертации

Газовые лазеры, активной средой которых является нейтральный или ионизированный газ, привлекают к себе большое внимание благодаря особым свойствам генерируемого ими излучения, характеризующегося высокой временной и пространственной когерентностью, монохроматичностью, направленностью, стабильностью работы как в непрерывном, так и в импульсном режимах. Широко известными представителями таких лазерных сред являются молекулярный азот и инертные газы неон и ксенон, генерация на которых возможна в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Особая популярность данных лазеров вызвана их применением в различных физических, технических и технологических приложениях, например, для проведения прецизионных измерений, мониторинга атмосферы, диагностики повреждений газопроводов и нефтепроводов, активных тепловизионных систем, беспроводной наземной и космической связи и др. В последнее время они нашли также широкое применение в медицине благодаря селективному характеру воздействия лазерного излучения на биологические ткани (напр., в дерматологии, онкологии, косметологии).



Наибольшее распространение получили газоразрядные лазеры с накачкой электрическим разрядом, в которых возбуждение активной среды происходит благодаря протеканию электрического тока между электродами, расположенными внутри разрядной камеры. Данный тип накачки обладает рядом недостатков, основным из которых является наличие металлических электродов в прямом контакте с активной средой. Сильноточный электрический разряд приводит к постепенному разрушению электродов, деформации их рабочей поверхности, возникновению неоднородности протекания электрического тока и, как следствие, неравномерности возбуждения активной среды, нестабильности работы лазера и ухудшению его энергетических и пространственных характеристик. Одновременно с этим происходит распыление материала катода и анода, что является причиной загрязнения газовой среды и элементов резонатора. Наличие перечисленных недостатков, свойственных большинству газоразрядных лазеров, ограничивает возможности применений лазеров с накачкой электрическим разрядом с электродами внутри разрядного объема.

В связи с этим актуальным является поиск новых методов возбуждения активных газовых лазерных сред, свободных от указанных недостатков. Одним из таких методов является использование индукционного импульсного разряда. Это может дать возможность получения больших объемов газоразрядной плазмы без примеси атомов материала электродов, повышенный ресурс работы, высокий уровень энерговклада, реализацию новых механизмов формирования инверсии в различных газах, высокую стабильность амплитуды лазерного излучения от импульса к импульсу и др. Другой особенностью индукционных лазеров является малая расходимость излучения, обусловленная формой пучка генерации. Данный параметр позволяет достигать предельно малых размеров сфокусированного пятна, что очень важно, например, в микроэлектронике при создании элементов микросхем. Без всяких сомнений, тема диссертационной работы Р. А. Ткаченко является актуальной.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Диссертация содержит 116 страницы машинописного текста, включая 65 рисунков, список из 26 работ соискателя по теме диссертации (11 научных статей и 15 тезисов докладов на конференциях) и список цитируемой литературы из 130 наименований.

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.

В первой главе обсуждены особенности и преимущества импульсного индукционного разряда как метода накачки активных газовых лазерных сред.



Описаны типы индукционных разрядов и свойственные им пространственные распределения электромагнитных полей. Рассмотрено теоретическое представление индукционного разряда в формализме трансформаторной модели. Описаны основные схемы возбуждения активных газовых сред импульсным индукционным разрядом, а также методы оптимизации их работы. Для формирования индукционных разрядов использовались лазерные излучатели в виде цилиндрических керамических трубок, а также трубок-капилляров с различными геометрическими параметрами. Отмечено, что индукционный разряд позволяет накачивать лазерные среды на основе атомов и молекул различных газов. Обсуждены используемые в работе измерительные приборы и их особенности, рассмотрены методики проведения исследований.

Во второй главе рассмотрены особенности молекулярного азота как активной лазерной среды, описаны процессы и реакции, протекающие в азотной разрядной плазме. Показано, что основным механизмом формирования инверсии населенностей на переходах  $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$  второй положительной системы полос молекулы азота при накачке продольным и поперечным электрическим разрядом является прямое возбуждение электронным ударом из основного состояния. При этом увеличение эффективности работы  $N_2$ -лазеров возможно за счет увеличения скорости возбуждения состояния  $C^3\Pi_u$ . Получена лазерная генерация на переходах  $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$  с длинами волн 337,1 и 357,7 нм. Впервые показана возможность достижения энергии генерации данного лазера 11 мДж за счет уменьшения периода осцилляций напряжений разрядного контура, а также увеличения активного объема индукционного излучателя. Впервые достигнута рекордная пиковая импульсная мощность излучения в 1 МВт с высокой эффективностью накачки, достигающей значения КПД 0,43 %.

Особенности инертного газа неона как активной среды разрядных лазеров рассмотрены в третьей главе. 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 разрядной плазмы. Описаны экспериментальные результаты, в которых впервые в импульсном индукционном разряде получена лазерная генерация на  $3p-3s$  переходах нейтральных атомов неона с длинами волн 540,1 нм, 585,3 нм, 614,3 нм. Проведено экспериментальное исследование энергетических и временных характеристик генерации индукционного Ne(I)-лазера, исследовано влияние различных газовых добавок на параметры излучения. Полученные характеристики генерации оказались на уровне максимальных результатов, достигнутых в электрическом разряде. Показано различие в механизмах формирования инверсии населенностей на переходах неона с длинами волн 540,1 и 585,3 нм, проявляющееся в формировании временной задержки для излучения на  $\lambda$



= 585,3 нм. Исследовано пространственное распределение интенсивности излучения в поперечном сечении генерации неона.

В четвертой главе рассмотрены особенности ксенона как активной среды разрядных лазеров. Впервые при накачке активных смесей ксенона импульсным индукционным разрядом получена лазерная генерация на переходах его нейтральных атомов с длинами волн 1,73 и 2,026 мкм. Добавка гелия к ксенону приводила к уменьшению интенсивности излучения Хе(I)-лазера. Длительность оптических импульсов зависела от метода формирования индукционного разряда и варьировалась в диапазоне от  $(6 \dots 8 \pm 1)$  нс до  $(60 \pm 2)$  нс на полувысоте. Энергия импульсов генерации достигала 0,1 мДж. 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 конце каждой из четырёх глав приведены выводы по данной части работы. Заключение перечисляет основные результаты, полученные в диссертации.

В конце диссертации приведён список из 26 публикаций соискателя по теме исследований, опубликованных в рецензируемых научных журналах, и список цитируемой литературы из 130 наименований.

### **Новизна, научная и практическая ценность полученных результатов**

В работе впервые получены следующие научные результаты:

1. При накачке активной среды молекулярного азота импульсным индукционным разрядом достигнута мощность излучения 1 МВт.
2. Экспериментально реализовано возбуждение импульсным индукционным разрядом активных сред на основе неона и ксенона с различными буферными добавками.
3. При возбуждении 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), и генерация на длинах волн  $\lambda_4 = 904,5$  нм;  $\lambda_5 = 1,73$  мкм и  $\lambda_6 = 2,026$  мкм на переходах Хе(I).
4. Показано различие механизмов формирования инверсии населенностей между электронными переходами нейтральных атомов неона, возбуждаемых импульсным индукционным разрядом, с длинами волн  $\lambda_1 = 540,1$  нм;  $\lambda_2 = 585,3$  нм;  $\lambda_3 = 614,3$  нм, проявляющееся в регистрируемой временной задержке появления оптических импульсов излучения.

Практическая ценность полученных результатов не подлежит сомнению. Реализованные в диссертационной работе условия формирования инверсии населенностей в импульсных индукционных лазерах могут быть использованы для создания новых газоразрядных источников когерентного излучения. 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. Разработан импульсный индукционный лазер на основе неона с излучением в видимой области спектра с возможностью его применения в онкологии, дерматологии и косметологии. Полученные результаты могут быть использованы для установления кинетических процессов, протекающих в неравновесной индуктивно связанной плазме, а также для создания теоретических моделей импульсных индукционных лазеров.

### **Достоверность полученных результатов**

Все полученные в диссертации результаты обладают высокой надежностью и достоверностью. Это подтверждается систематическим и комплексным характером исследования, тщательным описанием экспериментальной установки и условий создания разрядной плазмы, проведением экспериментов с использованием современных методик измерений и обработки результатов, а также совпадением полученных автором данных с результатами других работ, где такое сравнение было возможно.

### **Замечания по диссертации**

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.

Приведённые замечания и вопросы не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа Р. А. Ткаченко вносит заметный вклад в создание и возможное практическое применение нового класса газоразрядных лазеров на основе индукционного разряда. Следует особо отметить тщательность и полноту описания электрических схем создания импульсного индукционного разряда, что важно для обеспечения технической повторяемости эксперимента и дальнейшей практической реализации, а также условий достижения оптимальной генерации. Впечатляют достигнутые автором характеристики лазерной генерации как по мощности, так и по энергетической эффективности.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в курсах лекций для студентов соответствующих физических специальностей высших учебных заведений.

Диссертация **Ткаченко Романа Андреевича** «Импульсные газоразрядные индукционные лазеры на переходах молекулярного азота и нейтральных атомов неона и ксенона» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей важное теоретическое и практическое значение для оптики, спектроскопии и лазерной физики. Текст автореферата соответствует всем основным положениям и результатам, изложенным автором в диссертации. Диссертация **соответствует заявленной научной специальности 1.3.6 – «Оптика»**. Основные положения диссертации **апробированы** на международных научных конференциях (участие в 10 Всероссийских и международных конференциях с 15 представленными докладами) и опубликованы в 11 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. **Выносимые на защиту основные положения полностью соответствуют** изложенным в диссертации результатам.

По объему, научной новизне, практической ценности и достоверности результатов диссертация Ткаченко Р. А полностью соответствует требованиям Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук п. 9 Положения о присуждении ученой степени, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, а ее автор заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 – «Оптика».

Отзыв подготовил доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Кафедрой оптики, спектроскопии и физики плазмы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» Н.А. Тимофеев (e-mail: n.timofeev@spbu.ru).

Отзыв, составленный на основании ознакомления с текстом диссертации и автореферата, рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Оптики, спектроскопии и физики плазмы» Санкт-Петербургского государственного университета 28 июня 2024 г., протокол № 44/12/9-02-4. На заседании присутствовало 15 человек, отзыв одобрен единогласно.

Заведующий Кафедрой оптики,  
спектроскопии и физики плазмы  
СПбГУ, профессор, доктор физико-  
математических наук

Тимофеев Николай Александрович



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»  
г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034  
тел. 8 (812) 328-97-01  
e-mail: [spbu@spbu.ru](mailto:spbu@spbu.ru)  
<http://spbu.ru>