На правах рукописи



Панченко Николай Алексеевич

ЭФФЕКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ С НАКАЧКОЙ ДИФФУЗНЫМИ РАЗРЯДАМИ, ИНИЦИИРУЕМЫМИ ПУЧКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ ЛАВИН

01.04.21 – Лазерная физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук и в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, Ломаев Михаил Иванович

Официальные оппоненты:

Козлов Борис Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», кафедра «Электронные приборы», профессор

Губарев Федор Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа химических и биомедицинских технологий, доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится 26 декабря. 2019 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36 (Главный корпус ТГУ, аудитория 119).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: http://www.ams.tsu.ru/TSU/QualificationDep/co-searchers.nsf/newpublicationn/PanchenkoNA26122019.html

Snouper

Автореферат разослан « ____ » ноября 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Пойзнер Борис Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

работы. В настоящее время Актуальность газовые лазеры широко используются в экспериментах по воздействию на вещество, в различных технологических приложениях, биологии. медицине, для стимулирования химических процессов и т.д. параметром Важным лазера, определяющим возможность его применения, является КПД. Считается общепринятым, что для получения эффективной генерации необходимо сформировать в газовой среде объемный разряд. Термин «объемный» означает, что параметры такого разряда определяются процессами собственно в разряде, а в его объеме нет сильных пространственных флуктуаций плотности тока.

Условия формирования объемного разряда в газах высокого давления к началу настоящей работы были хорошо известны [1*–3*]. Для получения объемной плазмы необходимо обеспечить однородное электрическое поле в промежутке и определенный уровень предыонизации газа от различных источников, использовать импульсы высокого напряжения с крутым фронтом.

Следует отметить, что электроды однородного поля достаточно громоздки [4*, 5*], что увеличивает индуктивность лазерных промежутков. Система предыонизации также приводит к дополнительному увеличению габаритов лазеров. Это не позволяет формировать достаточно короткие импульсы возбуждения и ограничивает удельную мощность накачки $P_{\rm in}$.

Большой и не до конца решенной проблемой является контракция объемного разряда, причиной которой часто является неоднородности предыонизации и поля в промежутке [6*], появление катодных пятен, с которых начинается рост каналов [7*]. Контракция разряда наиболее сильно проявляется в смесях инертных газов с фтором и SF₆. Так, в лазерах на молекулах F_2 *, ArF*, KrF*, XeF* объемная стадия разряда обычно продолжается не более 20–30 нс [8*, 9*]. А в тяжелых инертных газах (Kr, Xe) при использовании традиционных методов инициирования контракция не позволяет получить объемный разряд уже при давлениях около 1 атм.

В последнее годы показана возможность получения объемных диффузных разрядов без дополнительной предыонизации промежутка. При подаче импульсов высокого напряжения с нс фронтом на промежуток с неоднородным электрическим полем (иглы, лезвия и т.д.) в процессе развития пробоя возникают пучки убегающих электронов (УЭ) и рентгеновское излучение, которые обеспечивают предыонизацию. Это приводит к формированию диффузной плазмы в газе высокого давления. Разряды, возникающие в данных условиях, предложено называть «объемные разряды, инициируемые пучками электронов лавин» (ОРИПЭЛ) [10*].

Следует отметить такие свойства ОРИПЭЛ, как высокая *P*_{in} до сотен МВт/см³ [11*], возможность получения диффузной плазмы при давлениях до ~10 атм. даже в тяжелых инертных газах, короткая длительность импульса. Это делает разряды данного типа привлекательными для накачки газовых лазеров.

Степень разработанности. К началу настоящей работы ОРИПЭЛ рассматривался, прежде всего, как источник рентгеновского излучения и пучков УЭ с короткой длительностью. Исследовалось влияние геометрии промежутка, состава и давления газа, амплитуды и длительности импульсов напряжения на параметры пучков УЭ и рентгеновского излучения, велись поиски условий достижения

максимального тока УЭ, рассматривались технологические применения разрядов данного типа (см., например, монографии [12* –14*] и ссылки в них). Применение разрядов, инициируемых УЭ, для получения лазерной генерации еще только начиналось.

С середины 80-х годов пучки УЭ с энергией несколько кэВ, формируемые в так называемом открытом разряде, использовались для накачки газовых лазеров. В [15*] была получена генерация на 2.03 мкм в Хе и его смеси с Не при давлениях 0,5–5 мм рт. ст. Мощность излучения не превышала 5 Вт при КПД 0,03%. Подобные исследования были проведены позднее в [16*]. Оптимальное соотношение компонент в смеси Не:Хе составило 99,5:0,5 при давлении гелия p=4–8 мм рт. ст. Наблюдался линейный рост мощности генерации с увеличением мощности накачки УЭ.

Исследования лазера на самоограниченном переходе гелия $2^1P_1^0-2^1S_0$ при накачке пучком УЭ из открытого разряда проведены в [17*]. Достигнут практический КПД лазера 0,056% при квантовом КПД 0,7%.

В [18*] УЭ, формируемые в отдельном промежутке, использовались для получения генерация на молекулах N_2 . Энергия УЭ составила около 10 кэВ при плотность тока 1 кА/см². Получена энергия излучения 1 мДж, но электрический КПД (относительно запасаемой энергии) не превышал 0,04%, что более чем в 5 раз ниже предельных КПД N_2 лазера. Давление газа в открытых разрядах составляет <100 мм рт. ст., что существенно ограничивает составы газовых сред, в которых может быть получена генерация.

Продольный разряд в виде волн ионизации, на фронте которых генерировались УЭ с энергией ~100 кэВ, также использовался для получения генерации на азоте. При этом энергия излучения на 337 нм не превышала 1 мДж при крайне низком КПД, который авторами даже не упоминался [19*].

Пучки УЭ, формируемые в воздухе, импульсами высокого напряжения, были применены для возбуждения кристаллов ZnSe и CdS и получения генерации в кристаллах в области длин волн 460–522 нм [20*].

На основе пучков УЭ, генерируемых в барьерном разряде, был запущен ИК лазер на ксеноне с частотой следования импульсов до нескольких кГц [21*].

Формирование диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле под действием нс импульсов напряжения с амплитудой до 350 кВ исследовались в [11*]. Диффузный разряд формировался в различных газах при давлениях до 6 атм., получена генерация в смеси Ar–Xe на длине волны 1,73 мкм.

В [22*] УЭ использовались для создания проводимости в активной среде CO₂ лазера. Получена генерация при давлениях активной среды до 5 атм. Энергия излучения составляла Q=40 мДж при η_0 =2,8%.

В [23*] исследовалась УФ-генерация в азоте и его смеси с SF₆ при накачке ОРИПЭЛ от генератора РАДАН-220. Однако малой активной длины энергия излучения не превышала 2 мДж при η_0 около 0,1%.

Из приведенного обзора можно сделать вывод, что параметры генерации в приведенных работах были далеки от предельных.

Цель диссертационной работы. Цель диссертационной работы заключается в поиске газовых смесей высокого давления различного состава, в которых при накачке диффузными разрядами, инициируемыми УЭ, возможно достижение

максимальных эффективности, мощности и (или) длительности импульсов лазерного излучения.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Проведение анализа научной литературы, посвящённой исследованию формирования объемных разрядов и разрядов с УЭ, включая ОРИПЭЛ, и применению разрядов с УЭ для накачки различных газовых лазеров.

2. Получение данных о вольт-амперных параметрах плазмы наносекундных диффузных разрядов, инициируемых УЭ, а также измерение спектральных и амплитудно-временных характеристик вынужденного излучения таких разрядов.

3. Определение условий достижения максимальных параметров вынужденного излучения, генерируемого диффузными разрядами, инициируемыми УЭ.

Методы и предмет исследования. Основным методом исследований является физический эксперимент. В контролируемых условиях и при многократном воспроизведении с использованием стандартных методик регистрации импульсов излучения, тока и напряжения на разрядном промежутке, стандартных методик оценки ошибок эксперимента измерялись следующие параметры ОРИПЭЛ:

- электрические параметры разряда;

- спектральные характеристики вынужденного и спонтанного излучения плазмы диффузного разряда;

- амплитудно-временные характеристики вынужденного и спонтанного излучения плазмы диффузного разряда;

Все измерения производились с помощью современной калиброванной аппаратуры.

Для интерпретации полученных данных проводились расчеты параметров источников N₂ лазера с использованием кинетических моделей, разработанных в Лаборатории теоретической физики ИСЭ СО РАН.

Положения, выносимые на защиту:

образованном лезвийными электродами, 1. В промежутке, при подаче импульсов напряжения с амплитудой более 250 кВ и временем нарастания около 1 нс в смесях инертных газов с фтором в диапазоне давлений 1-5 атмосфер формируется устойчивый диффузный разряд, инициируемый пучками убегающих электронов, длительностью 30-50 нс и достигаются КПД и длительность импульсов генерации на молекулах XeF* и KrF* и BV Φ переходе молекул F*₂, сопоставимые с лазерными характеристиками, полученными при накачке поперечными объемными разрядами предыонизацией В разрядных системах, образованными с профилированными электродами.

2. В активных смесях азота с элегазом при полном давлении 30–100 мм рт. ст. в диффузном разряде, инициируемом убегающими электронами в промежутке «лезвие-лезвие» в условиях рассогласования сопротивления плазмы разряда R_d и импеданса генератора накачки ρ в диапазоне $R_d/\rho=0,12-0,4$ реализуем режим генерации азотного лазера с двумя и тремя пиками излучения в последовательных осцилляциях тока в промежутке из-за увеличения напряжения горения разряда за счет прилипания электронов к электроотрицательным молекулам элегаза.

3. В активных смесях азота с элегазом при соотношении парциальных давлений газов N₂:SF₆=10:1 и полном давлении 300–400 мм рт. ст. и в активных смесях гелия,

азота и элегаза при соотношении парциальных давлений газов He:N₂:SF₆=10:10:1 при давлении до 1 атм благодаря диффузному разряду, инициируемому пучками убегающих электронов между лезвийными электродами, длительностью 10 нс достижим предельный электрический КПД генерации на второй положительной системе азота.

4. В активных смесях SF_6 с водородом либо дейтерием в соотношении $SF_6:H_2(D_2)=8:1$ при полном давлении 300–400 мм рт. ст., благодаря диффузному разряду, инициируемому пучками убегающих электронов между лезвийными электродами, реализуются оптимальные режимы накачки и достигается предельный внутренний КПД генерации нецепных электроразрядных HF – и DF – лазеров до 7–10%.

Достоверность и обоснованность научных положений и других результатов работы

1. Достоверность первого научного положения подтверждается воспроизводимостью результата измерений длительности импульса и КПД генерации на молекулах XeF*, KrF*, F₂*, близкой к 80%, совпадением полученных параметров генерации с характеристиками лазеров на фторидах инертных газов и фторе при их накачке поперечным объемным разрядом с предыонизацией [24*–28*].

2. Достоверность второго научного положения подтверждается, воспроизводимостью результата, близкой к 100%, совпадением расчетных и измеренных параметров генерации азотного лазера, близким к 90%;

3. Достоверность третьего научного положения подтверждается воспроизводимостью результата близкой к 100%, согласием полученных значений КПД генерации с данными научной литературы близким к 90% [29*–31*], совпадением результатов измерений с результатами численного моделирования работы азотного лазера близким к 90%;

4. Достоверность четвертого научного положения подтверждается воспроизводимостью результата, близкой к 90%, согласием полученных значений оптимальных удельной энергии излучения, длительности импульса накачки и предельных КПД генерации нецепных химических лазеров с данными научной литературы [32*, 33*].

Новизна выносимых на защиту положений

Новизна <u>первого</u>, <u>третьего</u> и <u>четвертого</u> научных положений заключатся в применении для накачки газовых лазеров диффузных разрядов, инициируемых УЭ. С такой накачкой без дополнительной предыонизации реализованы лазеры на молекулах XeF*, KrF*, F_2 * с характеристиками, сравнимыми с характеристиками электроразрядных лазеров с предыонизацией (2016–2017 гг.). Так же в активных средах N₂-SF₆-(He) и SF₆-H₂(D₂) при давлении до 1 атм получена генерация на молекулах N₂, HF(DF) с предельным электрическим КПД (2013–2015 гг.).

Новизна <u>второго</u> научного положения заключается в том, что было предложено совместить условия рассогласования сопротивления плазмы диффузного разряда в смесях N₂-SF₆, He-N₂-SF₆ и импеданса генератора накачки в промежутке типа «лезвие-лезвие» с увеличением напряжения горения разряда за счет прилипания к электроотрицательным молекулам элегаза для получения нового режима генерации азотного лазера (2014–2018 гг.).

Новизна полученных результатов

Получены предельные КПД генерации в диффузном разряде, инициируемом пучками УЭ, в смесях высокого давления N_2 -SF₆, He-N₂-SF₆ и SF₆-H₂(D₂), на молекулах N₂ и HF(DF) (2013–2018 гг.).

В условиях рассогласования импедансов плазмы разряда и генератора в диффузном наносекундном разряде в промежутке типа «лезвие-лезвие» получен новый режим генерации азотного лазера с двумя и тремя пиками излучения в течение нескольких последовательных осцилляций тока разряда (2014–2018 гг.).

Показано, что в смесях инертных газов с фтором в системе лезвийных электродов формируется устойчивый диффузный разряд большой длительности и достигаются длительность и КПД генерации на молекулах XeF*, KrF*, F₂* сравнимые с данными характеристиками в электроразрядных лазерах с накачкой объемным разрядом с предыонизацией (2016–2017 гг.).

Научная ценность

Найдены условия накачки диффузными разрядами, инициируемыми УЭ, газовых лазеров, работающих на различных молекулах в широком диапазоне спектра от ИК до ВУФ диапазона, в которых достигаются предельные эффективности генерации и увеличение длительности импульсов излучения, а также реализуются новые режимы генерации;

Обнаружено, что при накачке мощными диффузными разрядами длительностью 10 нс в смесях элегаза с дейтерием наблюдается лазерное излучение на переходах *P*-ветви молекул DF, верхние уровни которых заселяются в «горячих» реакциях атомов дейтерия с молекулами фтора $D+F_2 \rightarrow DF(v)$, v>4.

Практическая значимость

При накачке диффузным разрядом, инициируемым пучками УЭ, получен КПД азотного лазера близкий к 0,2–0,23%, что превышает результаты, полученные в большинстве работ при использовании накачки поперечным разрядом с предыонизацией, на 10–15% [31*] и сравнимо с работами [29*–30*].

В диффузных разрядах, инициируемых пучками УЭ, получен КПД нецепных HF(DF) лазеров 7–10%, что соответствует предельному значению и сравнимо с результатами, полученными при накачке поперечным разрядом с предыонизацией [32*, 33*].

Реализованы новые режимы генерации азотного лазера.

Внедрение результатов и предложения по их использованию

Результаты диссертационной работы использованы в следующих грантах:

1. Грант РФФИ № 14-08-00074-а «Эффективная лазерная генерация в мощных наносекундных диффузных разрядах» (2014–2016 гг.);

2. Грант РНФ № 14-29-00052 «Создание новых технологий модификации, упрочнения и очистки поверхности металлов и диэлектриков импульсной плазмой разрядов атмосферного давления, формируемых за счет убегающих электронов» (2014–2016 гг.).

3. Работа поддержана Министерством образования и науки в рамках базовой части проекта № 3.9605.2017/8.9 «Особенности эмиссии электронов из плазмы и

формирования электронных пучков в области повышенных давлений форвакуумного диапазона для пучково-плазменной модификации материалов».

Апробация результатов работы

Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих Международные научно-практическая конференциях: IV-VII конференции «Актуальные проблемы радиофизики», г. Томск, Россия, 2012, 2013, 2015, 2017 гг.; Conferences on Lasers, Applications, and Technologies (LAT), Minsk, Belarus, 2016 г.; XI-XIII Международных конференциях «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул», г. Томск, Россия, 2013, 2015, 2017 гг.; The 1 Russian-Chinese Symposium on Laser Physics and Laser Technologies, Tomsk, Russia, 2012 r.; 17-19 International Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, 2014, 2016, 2018 гг.; XV-XVI Международных конференциях по методам аэрофизических исследований (ICMAR), г. Новосибирск, Россия, 2013, 2015 гг.; The 3 and 4 International Symposium on Laser Interaction with Matter, LIMIS-2014, Nanjing, China, 2014 r., LIMIS-2016, Chengdu, China, 2016 r.; The 20 and 21 International Symposium on High Power Laser Systems & Applications, Chengdy, China, 2014 r., Gmunden, Austria, 2016 r.; VI Всероссийская конференция молодых ученых "Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии"(Томск, 2016 г.); The VII International Symposium «Modern Problems of Laser Physics» (MPLP-2016), Novosibirsk, Russia, 2016 г.; XIII Международная конференция «Газоразрядная плазма и её применение», Новосибирск, Россия, 2017, 24 Всероссийская научная конференция студентовфизиков и молодых ученых (ВНКСФ-24), Томск, 2018 г.

Личный вклад автора. Представленные в настоящей диссертации результаты получены лично автором, а также при совместной работе с соавторами публикаций: Ломаевым М.И., Сорокиным Д.А., Тарасенко В.Ф., Панченко А.Н. и Сусловым А.И.

Постановка задач осуществлялась научным руководителем Ломаевым М.И. и Панченко А.Н. при участии автора диссертации.

Подготовка экспериментальных стендов и проведение экспериментов по исследованию параметров объемных разрядов, инициируемых убегающими электронами, и параметров вынужденного и спонтанного излучения, генерируемого этими разрядами, осуществлялась автором лично либо при участии *Панченко А.Н.*

Обработка и анализ исходных экспериментальных данных осуществлялись автором диссертации.

Расчёты параметров диффузных разрядов, инициируемых УЭ, и параметров вынужденного излучения в смесях N₂-SF₆ осуществлялись совместно с н.с. лаборатории теоретической физики ИСЭ СО РАН *Сусловым А.И.*

Обсуждение и интерпретация результатов экспериментов проводились совместно с соавторами публикаций.

Публикации. Представленные в настоящей диссертации результаты опубликованы в 21 работе: 11 статей 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 (из них 2 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science; 4 статьи в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, и 2 статьи в российских

научных журналах, переводные версии которых входят в Scopus), 6 статей в электронных сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science, 3 монографии в соавторстве (из них 2 монографии, входящие в Scopus), 2 публикации в прочих научных журналах.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованной литературы. Объём работы составляет 152 страницы. В работе насчитывается 72 рисунка, 2 таблицы и 253 библиографических наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности проведённого исследования; обозначена цель исследования и определён круг задач; сформулированы защищаемые научные положения; отмечены их новизна, научная ценность, практическая значимость

В первой главе кратко изложены общие сведения о механизмах формирования объемного разряда, в том числе с предыонизации; описаны свойства диффузного разряда, инициируемого УЭ, при различном давлении газа; дан обзор работ по использованию объемных диффузных разрядов в квантовой электронике.

Во второй главе описаны экспериментальная установка и методики измерения различных параметров, проводимых в ходе эксперимента; определена энергии, запасаемая в передающей линии генератора РАДАН-220, которая составила E_1 =1,56 Дж или E_2 =2,1 Дж; описана модель азотного лазера на смеси N₂-SF₆ с накачкой ОРИПЭЛ; приведены оценки погрешности измерения ряда физических величин.

В третьей главе представлены результаты исследований генерации на молекулах N_2 при накачке диффузным разрядом, инициируемым УЭ, в чистом азоте и смесях азота с SF₆, NF₃ и(или) Не при давлении от 50 мм рт. ст. до 5 атм [2–4, 6, 8, 10, 16].

Известно, что верхний лазерный уровень перехода $C^{3}\Pi_{u} - B^{3}\Pi_{g}$ на $\lambda=337$ нм заселяется прямым электронным ударом при $E/(p \times d) \ge 100$ B/(см×мм рт. ст.) на промежутке, где E – напряженность электрического поля, p – давление азота, d – расстояние между электродами [30*]. Величина параметра $E/(p \times d)$ спадает за несколько нс после пробоя. Поэтому для получения эффективной генерации на азоте необходимо использовать импульсы с длительностью не более 10 нс. Поэтому используемый в экспериментах генератор РАДАН-220 формировал оптимальные для накачки азотного лазера импульсы, а использование смесей азота с SF₆ позволяло увеличить мощность накачки и энергию УФ излучения за счет согласования импедансов разряда и генератора.

Для оптимизации состава и давления газовой среды проводилось численные расчеты работы азотного лазера на смеси N₂-SF₆ с использованием модели, подробно описанной в главе 2. Полученные результаты иллюстрируют рисунки 1, 2. Максимальная энергия УФ излучения для E_1 =1,56 и E_2 =2,1 Дж составила 3,1 мДж и 4,2 мДж. Добавки гелия в смесь N₂-SF₆ привели к дальнейшему росту энергии генерации на 15%. При этом КПД лазера достигал $\eta_0 \approx 0,2-0,23\%$. Этот КПД

превышает результаты большинства работ, полученные в поперечном разряде с предыонизацией, на 10–15% [31*] и равен предельному значению для N₂ лазера [29*–30*]. Удельная энергия генерации достигала 200 мДж/л, что совпадает с данным параметром лазеров на азоте с накачкой разрядами с предыонизацией [34*, 35*].



Рисунок 1 – Измеренные (а) и расчетные (б) осциллограммы импульсов тока разряда *I*_d, напряжения на лазерном промежутке *U*_d и излучения на второй (*P*₃₃₇) положительной системе азота в смесиN₂:SF₆=300:45 мм рт. ст. *E*₁=1,56 Дж



Рисунок 2 – Зависимости энергии генерации на 337,1 нм и электрического КПД азотного лазера от добавок SF₆ в 300 мм рт. ст. азота для E_1 =1,56 (1) и E_2 =2,1 Дж (2)

При уменьшении давления смеси N₂-SF₆ сопротивления разряда R_d падает, и ток ОРИПЭЛ становился колебательным. При этом R_d и импеданс генератора р соотносятся как $R_d/\rho=0,12-0,4$ за исключением периода в 1–1,5 нс при приближении тока к 0, когда расчетная величина R_d будет не корректной из-за деления U_d на величину, близкую к 0. В этих условиях впервые были получены новые режимы работы азотного лазера, в которых два или три импульса генерации наблюдаются в течение нескольких последовательных колебаний тока (рисунки 3, 4). Расчеты показали, что при приближении тока ОРИПЭЛ к нулю за счет высокой скорости прилипания электронов к молекулам SF_6 происходит быстрое падение проводимости плазмы, что позволяет поддерживать величину Е/р на лазерном промежутке выше порогового значения *E/p*>100 B/(см× мм рт. ст.). В результате

инверсия на переходе $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ поддерживается в течение нескольких полупериодов тока разряда. Это и приводит к появлению последовательных лазерных импульсов.



Рисунок 3 – Измеренные (а) и рассчитанные (б) импульсы тока разряда *I*_d, импульсы азотного лазера *P*_{лаз} и расчетная зависимость параметра *E/p* от времени для ОРИПЭЛ в смеси N₂:SF₆=30:30 мм рт.ст. и форма импульса лазерного излучения в смеси He:N₂:SF₆=100:30:30 мм рт. ст. *P*_{лаз}(He) (а)



Рисунок 4 – Расчетные населенности уровней азота и концентрации электронов (а), а также скорости различных процессов (б) в плазме ОРИПЭЛ, смесь N₂ : SF₆ = 30 : 30 мм рт. ст.

В ходе экспериментов было обнаружено, что добавки гелия в смесь N_2 -SF₆ позволяют перераспределять мощность и энергию излучения в отдельных пиках и изменять спектр и форму импульса излучения (рисунок 3, а). При этом максимальная мощность лазерного излучения может достигаться во втором или третьем пике на λ =357 нм.

В расчетах ОРИПЭЛ считается однородным. Совпадения расчетов с экспериментом показывает, что ОРИПЭЛ в смесях N₂ с SF₆ сохраняет объемный характер горения в течение длительного времени. В этих условиях в промежутке формируются широкие диффузные струи, а спектр излучения плазмы ОРИПЭЛ типичен для объемного разряда в азоте. Наибольшую интенсивность имели полосы второй положительной системы азота (полоса $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$). Известно, что при контракции разряда интенсивность данной полосы резко падает, а в спектре излучения появляется интенсивный континуум [36*]. Это также говорит о

достаточной устойчивости ОРИПЭЛ, длительность диффузной фазы которого достигает 40–50 нс.

В четвертой главе приводятся параметры генерации в смесях SF₆ с H₂ и D₂ при накачке ОРИПЭЛ [2–9]. Оптимальные условия накачки поперечным разрядом нецепных химических лазеров определены в [32*, 33*]. Максимальные КПД генерации на молекулах HF(DF) реализуются при использовании профилированных электродов, подсветке рабочей смеси, длительности импульса накачки менее ~100 нс и удельном энерговкладе $E_{\rm YA}$ =30–70 Дж/л. В данных получена максимальную эффективность работы HF и DF – лазеров. Предельный внутренний КПД (относительно вложенной энергии) при этом составляет $\eta_{\rm int}$ =10 и 7% для HF и DF-лазеров.

Отметим, что в промежутках величиной в несколько см разряд в смесях SF₆– H₂(D₂) становится неустойчивым. Поэтому для получения максимальной эффективности генерации нецепных лазеров наиболее оптимальны короткие импульсы накачки [37].

Инверсия населенностей в нецепном химическом электроразрядном лазере на смесях элегаза с водородом и дейтерием достигается только на *P* ветви молекул HF(DF) и формируется в «холодных» химических реакциях:

F+H₂→HF*(v≤3)+H+132 кДж/моль

F+D2→DF*(v≤4)+D+128 кДж/моль,

в ходе которых возникают возбужденные молекулы с колебательным квантовым числом *v* до 3 (HF-лазер) и 4 (DF-лазер).

При накачке нецепного лазера пучком электронов возможно протекание «горячих» реакций с участием атомов водорода (дейтерия), возникающих в реакциях (1) и (2):

F₂+H→HF*(v≤8)+F+409 кДж/моль

F₂+D→DF*(v≤10)+F+415 кДж/моль,

что расширяет спектр генерации [38*]. Атомы и молекулы фтора образуются в результате диссоциации SF₆ в активной газовой среде. Наибольшая доля энергии, выделяющейся в реакциях (1) и (2), идет на заселение колебательных уровней молекул DF^{*}(v) с v=3, и молекул HF^{*}(v) с v=2. Соответственно, максимальная энергия в нецепных DF лазерах обычно излучается на P_3 линиях, а в HF лазерах – на P_2 линиях [38*].

В наших экспериментах было показано, что диффузный разряд в смесях с SF₆ легко формируется между лезвийными электродами. Измеренные в [39*] токи пучка УЭ в чистом элегазе при давлении 0,5 атм. составляли около ~0,1 А и росли при уменьшении давления, что, по-видимому, достаточно для объемной предыонизации газовой среды при подаче импульсов напряжения с амплитудой > 250 кВ.

Однородность диффузного разряда, формируемого УЕ, дает возможность получать предельные КПД генерации нецепных HF(DF) лазеров. Параметры HF(DF) лазеров приведены на рисунках 5, 6. Максимальная энергия излучения на молекулах HF получена в смесях с водородом и составила Q=110 мДж при пиковой мощности излучения более 1 МВт. Энергия излучения на молекулах DF возрастала с увеличением добротности резонатора и достигала Q=75 мДж. Это связано с

(1) (2)

(3)

(4)

меньшим коэффициентом усиления в активной среде DF лазера из-за большего числа лазерных линий излучения.



Рисунок 5 – Зависимости энергии излучения HF(DF) лазеров от коэффициента отражения выходного зеркала в смесях с водородом, этаном и дейтерием, E_2 = 2,1 Дж

Длительность импульса тока ОРИПЭЛ составила 12 нс, за это время в активную среду вкладывалась энергия $E_{BJ}=1,1$ Дж при мощности накачки до 250 МВт. Легко видеть, что внутренний КПД генерации на молекулах НF составляет $\eta_{int}=10\%$, что соответствует предельному значению для лазеров этого типа. Полученный КПД генерации DF лазера ($\eta_{int}=6,8\%$) также близок к предельному для DF-лазера $\eta_{int}\approx7\%$. Апертура пятна генерации была равна 4 мм откуда следует что активный объем равен V = 20 см³, а удельная энергия накачки $E_{in}=55$ Дж/л попадает в диапазон оптимальных значений E_{in} [32*, 33*].

Как и в случае оптимальных режимов накачки [32*, 33*] интегральный импульс излучения HF(DF) лазеров имел один пик, а в спектре генерации наблюдались интенсивные каскадные переходы.





Примеры каскадных переходов в спектре излучения HF(DF) лазеров приведены на рисунках 7, 8. Каскадные переходы существенно изменяет распределение энергии излучения HF(DF)-лазеров по полосам *P*-ветви. Так, для условий рисунка 7 получено следующее распределение энергии излучения на молекулах HF: $Q(P_1):Q(P_2):Q(P_3)=1:0,62:0,1$. Распределение энергии по линиям каскадов в DF-лазере было следующим: $P_4(3):P_3(5):P_2(6):P_1(7)=1:4:10:15$ и $P_4(5):P_3(6):P_2(7):P_1(8) = 0,5:1,2:2:0,9.$ Наличие интенсивных каскадов свидетельствует об однородности активной среды нецепных лазеров на основе ОРИПЭЛ. Как известно [40*], в контрагированном разряде каскадные переходы исчезают, а импульс излучения состоит из отдельных пиков.



Рисунок 7 – Распределение мощности (а, б) и энергии (в) излучения по линиям каскадных переходов *P*-ветви в спектре HF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ. Смесь SF₆:H₂=240:30 мм рт. ст., *E*₁=1,56 Дж. *I*_d – ток ОРИПЭЛ

Каскадные переходы приводят к росту эффективности извлечения энергии из активной среды нецепного лазера, так как одна возбужденная молекула $HF^*(v \le 3)$ или $DF^*(v\le 4)$ может произвести до 3–4 фотонов [32*, 33*]. Кроме того, за счет мощного импульса накачки генерация на отдельных линиях начиналась через 10–20 нс после формирования ОРИПЭЛ с разбросов около 5 нс. Это приводит к падению потерь энергии излучения при достижении порога генерации. Полученные в эксперименте особенности возбуждения ОРИПЭЛ обеспечивают предельный КПД нецепных HF(DF) лазеров.

счет высокой мощности ОРИПЭЛ За накачки однородности при И максимальных добротностях резонатора спектре генерации DF В лазера зарегистрированы слабые линии на полосе P_5 с v=5, формируемые в «горячих» реакциях (4)–(5). Импульсы излучения на данных линиях, подобно [41], начинались через ≈75 нс после начала тока разряда, а их интенсивность была на один-два порядка ниже интенсивности остальных линий. Большое время запаздывания появления генерации на этих линиях связано с необходимостью наработки достаточной концентрации атомов дейтерия в «холодных» реакциях (1) и (2).



Рисунок 8 – Распределение мощности (а, б) и энергии (в) излучения по линиям каскадных переходов в спектре DF-лазера с накачкой ОРИПЭЛ. Смесь SF₆:D₂=240:30 мм рт.ст., *E*₁=1,56 Дж. *I*_d – ток ОРИПЭЛ

Как отмечалось выше, генерация на полосах с v>3-4 молекул HF(DF) обычно наблюдается при мощной накачке пучком электронов, а в обычном поперечном разряде порог генерации на этих переходах не достигается. Генерация на данных линиях в электроразрядном нецепном лазере получена впервые.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований параметров генерации в диффузном разряде, инициируемом УЭ, в смесях инертных газов с фтором и трифторидом азота при давлении до 5 атм [1–4, 6–14, 21].

Для возбуждения лазеров на молекулах XeF*, KrF*, ArF*, F₂* обычно используется объемный разряд с предыонизацией. При этом длительность импульсов излучения данных ограничена контрагированием лазеров или филаментацией объемного разряда, которые развиваются через 10-30 нс после пробоя промежутка [6*-9*]. Это ведет к необходимости использовать для возбуждения лазеров фторидах генераторы, формирующие на импульсы длительностью ≈10 нс, что соответствует параметрам генератора РАДАН-220.

Максимальные энергии излучения достигались в смесях с буферным газом Не. В смесях с Ne из-за низкого сопротивления разряда падала мощность накачки и энергия генерации.

ХеF*-лазер. Длительность импульсов генерации ХеF*-лазеров с накачкой объемным разрядом с предыонизацией составляет 20–30 нс при энергии излучения ~ 100 мДж. КПД ХеF*-лазера не превышает η₀≈1% [24*].

На рисунке 9 показана интегральная фотография ОРИПЭЛ в типичной смеси XeF*-лазера. Разряд имеет вид широких диффузных каналов, которые начинаются на электродах и затем быстро расширяются к середине промежутка, образуя однородное объемное свечение без признаков контракции. Подобный вид имел разряд и в смесях KrF* лазера. Ширина пятна генерации в лазерах на фторидах составляла 4–5 мм.



Рисунок 9 – Интегральная фотография разряда и пятно генерации в смеси He:Xe:F₂=3 атм:15 : 5 мм рт. ст.

На рисунке 10 приведены основные данные, описывающие режим накачки XeF*лазера ОРИПЭЛ. В экспериментах использовались смеси с F₂ и NF₃. ОРИПЭЛ во всех случаях имел осциллирующий характер и продолжался до 50 нс. При этом затухание тока в смесях с фтором происходило быстрее, что говорит о более высоком сопротивлении плазмы разряда в данных рабочих смесях.



Рисунок 10 – Характерные осциллограммы тока разряда (*I*_d), спонтанного (*P*_{sp}) и лазерного (*P*_{las}) излучения на молекулах ХеF* и атомах фтора (*P*_{las}, *FI*) для выходных зеркал с коэффициентами отражения *R*=7% и 70% в смесях He:Xe:NF₃=3,5 атм:15:5 мм рт. ст (а) и He:Xe:F₂=3,5 атм:15:5 мм рт. ст. (б), второе зеркало имеет *R*=100%

Время запаздывания начала генерация на молекулах XeF* в смесях с F₂ возрастало, а энергия излучения была в 3 раза ниже. Это связано с поглощением молекулами фтора излучения на 351–353 нм и тушением фтором молекул XeF*.

Максимальная энергия излучения на молекулах XeF* в смесях с NF₃ достигала Q=10 мДж. Это соответствует КПД XeF*-лазера $\eta_0=0,65\%$, что близко к параметрам большинства электроразрядных лазеров на молекулах XeF* [24*]. Лазерный импульс продолжалось в течение 2–3 периодов тока, а его полная длительность достигала 45 нс. Это говорит о сохранении ОРИПЭЛ диффузной фазы горения даже после неоднократной смены направления протекания тока в промежутке.

КгF*-лазер. Режим работы KrF*-лазера с накачкой ОРИПЭЛ представлен на рисунке 11. В экспериментах использовались газовые смеси с фтором, поскольку в смесях с NF₃ заметно снижается эффективность образования молекул KrF* за счет большой скорости реакции перезарядки:

$$Kr^{+} + NF_{3} \rightarrow Kr + NF_{3}^{+}$$
(5)



Рисунок 11 – Характерные осциллограммы тока разряда *I*_d, спонтанного (*P*_{sp}) и лазерного излучения на λ=248 нм *P*_{las} и линиях атомарного фтора (*P*_{FI}) для выходных зеркал с *R*=7% и 50% в смесях He:Kr:F₂=3,5 атм:100:5 мм рт. ст. (а) и зависимости энергии излучения и КПД KrF* лазера от давления смеси He:Kr:F₂=X : атм:100:5 мм рт. ст. (б), второе зеркало имеет *R*=100%

Как ХеF*-лазера, случае через после пробоя И несколько нс В промежутканаблюдался короткий импульс излучения на линиях FI. Генерация на молекулах KrF* начиналась через 10 нс и продолжалась в течение двух периодов тока, полная длительность лазерных импульсов достигала 35 нс. Это говорит об устойчивости ОРИПЭЛ в смесях Не-Кr-F2. Энергия излучения росла линейно с давлением гелия и достигала 24 мДж при КПД лазера до $\eta_0 = 1.5\%$, что близко к КПД $(\eta_0=2\%)$ KrF-лазеров в газовых смесях с буферным газом Не при накачке объемным разрядом с предыонизацией [25*].

Оценим теперь внутренний КПД КгF*-лазера η_{int} . Вложенную энергию можно рассчитать, зная ток разряда и напряжение на лазерном промежутке U_{qs} , которое через несколько нс после пробоя определяется составом и давлением газовой смеси. Измерения, проведенные в [43*] для смеси с парциальным давлением фтора 5 мм рт. ст. дали значение $U_{qs}/(p \times d)=2,3$ В/(см×мм рт. ст.). Оценка вложенной энергии для давления смеси 5 атм и данного $U_{qs}/(p \times d)$ дает величину вложенной энергии $E_{B\Pi}=0,6$ Дж. Из оценок следует, что внутренний КПД КгF*-лазера с накачкой ОРИПЭЛ может достигать $\eta_{int}>3\%$, что также сопоставимо с параметрами KrF* лазеров с накачкой поперечным разрядом с предыонизацией. При этом пиковая мощность, вкладываемая в ОРИПЭЛ, достигает 2 МВт/см³, что также близко к режимам накачки KrF*-лазеров объемными разрядами [26*, 27*].

Высокая амплитуда подаваемых на промежуток импульсов (>250 кВ) и быстрое нарастание плотности тока проводимости dj/dt > 50 A/(см²×нс) обеспечивают режим формирования разряда, близкий к описанному в [44*]. Данный режим обеспечивает высокую устойчивость диффузного разряда.

Полученные результаты показывают, что при накачке ОРИПЭЛ XeF* и KrF* лазеров достигаются КПД и длительности импульсов генерации, сравнимые с параметрами излучения лазеров с накачкой объемным разрядом с предыонизацией. При этом отсутствие системы предыонизации и компактные лезвийные электроды значительно упрощают конструкцию лазера и снижают индуктивность разрядного промежутка.

ArF*-лазер. Подобно XeF* и KrF*лазерам, импульс генерации на молекулах

ArF* наблюдался в течение нескольких полупериодов тока разряда в течение 25 нс. Энергия излучения была низкой и не превышала 1 мДж. В смесях с аргоном ОРИПЭЛ состоял из узких диффузных струй, неравномерно распределенных по длине электродов. Это существенно снижало реальную активную длину, что и приводило к низкой энергии генерации на молекулах ArF*.

Лазеры на смеси Не-F₂. ВУФ генерация в ОРИПЭЛ. Параметры генерации в смесях Не-F₂ приведены на рисунке 12. В экспериментах получена одновременная генерация на красных линиях фтора и на переходе молекулы F₂* в ВУФ области спектра на λ =157 нм. Отметим, что F₂*-лазер с накачкой ОРИПЭЛ запущен впервые.



Рисунок 12 – Характерные осциллограммы тока разряда I_d , лазерного излучения на переходах атомарного (FI) и молекулярного (P_{157}) фтора для различных выходных зеркал, смесь He: F₂ = 5 атм: 5 мм рт. ст. (а) и зависимости энергии излучения FI ($Q_{\rm FI}$) лазера и полной энергии излучения и энергии излучения в отдельных пиках F₂^{*} (Q_{157}) лазера от давления He в смеси с 5 мм рт. ст. F₂ (б). Зеркало с Al покрытием используется в качестве «глухого», E_2 =2,1 Дж

Характерной особенностью лазера на атомарных линиях фтора является малое время запаздывания генерации и широкая область генерации, достигающая 1 см. Это говорит о наличии достаточно широкой области протекания тока в течение нескольких нс в начале ОРИПЭЛ. Затем область протекания тока разряда снижается до нескольких мм и, поскольку для достижения порога генерации на молекулах XeF*, KrF*, ArF* требуется высокая плотность тока (рисунок 9).

В спектре излучения FI лазера наблюдалось 7 линий в области 620–760 нм. Энергия излучения линейно росла с давлением Не и достигала 0,2 мДж при 5 атм, длительности импульса при установке выходного зеркала с *R*=90% достигала 25 нс.

Лазерный импульс на λ =157 нм имел два ярко выраженных пика в двух полупериодах тока разряда и более слабый третий пик в течение следующих 10 нс, длительность ВУФ лазерного импульса достигала 25 нс. Мощность излучения в первых двух пиках и энергия генерации росли экспоненциально с ростом давления смеси, но показатель экспоненты уменьшался при давлениях более 3 атм. Максимальная пиковая мощность и энергия излучения на λ =157 нм при давлении гелия 5 атм достигали ~230 кВт и 2 мДж, соответственно.

В экспериментах электрический КПД F_2 лазера составил $\eta_0=0,1\%$, что, как и в случае работы на молекулах XeF* и KrF*, сопоставимо с параметрами F_2^* -лазеров, полученными при возбуждении объемным разрядом с предыонизацией ($\eta_0=0,15\%$)

[28*]. В условиях нашего эксперимента быстрое начало генерации на красных линиях фтора и ее длительность говорит о высокой концентрации возбужденных атомов фтора F* в плазме ОРИПЭЛ в течение, по крайней мере, 20 нс после пробоя промежутка. Возбужденные атомы фтора F* затем участвуют в заселении верхнего лазерного уровня ВУФ перехода и могут влиять на форму импульса F_2 лазера. Возбужденные атомы фтора могут также возникать в столкновениях с убегающими электронами еще на стадии роста напряжения на промежутке.

ВУФ излучение в смесях чистых инертных газов. ОРИПЭЛ в бинарных смесях Kr-Xe и Ar-Xe интенсивно излучает в ВУФ области спектра на длине волны вблизи λ =147 нм. В [45*] сообщалось о возможности усиления в смесях Ar-Xe при накачке ОРИПЭЛ. Было показано, что увеличение длины плазменного образования и установка резонатора приводит к заметному увеличению интенсивности излучения гетероядерного димера.

В наших экспериментах исследовалось ВУФ излучение ОРИПЭЛ в двойных Ar-Хе и тройных смесях Ar-Xe-(He) и Ar-Kr-(He) при активной длине разряда 30 см [14, 15, 20, 21]. При увеличении активной длины интенсивность ВУФ излучения в двойной смеси возрастала в несколько раз по сравнению с данными [44*]. Добавки гелия в смесь Ar-Xe (Kr) приводили к дальнейшему росту интенсивности ВУФ излучения при одновременном сокращении ее длительности на полувысоте. При этом ВУФ излучение появлялось через 5–10 нс после формирования ОРИПЭЛ, что может быть признаком генерации. Для проверки этого предположения нужны дополнительные эксперименты с использованием резонаторов с высокой обратной связью.

Полученный результат показывает перспективность использования ОРИПЭЛ в качестве основы для создания электроразрядного ВУФ-лазера, активную среду в котором составляют возбужденные молекулы инертных газов.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы:

1. Реализован способ накачки газовых лазеров диффузными разрядами, инициируемыми пучками УЭ. Показано, что при подаче на лезвийные электроды импульсов высокого напряжения с амплитудой >200 кВ и коротким фронтом, в газовых смесях высокого давления без дополнительной предыонизации формируется диффузная плазма, которая является эффективным источником вынужденного излучения в различных спектральных диапазонах от ИК до ВУФ области.

2. Проведено экспериментальное и численное исследование работы УФ азотного лазера с накачкой диффузным разрядом, инициируемым УЭ. Показано, что в газовых смесях SF₆-N₂ достигается КПД азотного лазера, близкий к $\eta_0=0,2\%$. Показано, что добавки Не в бинарную смесь SF₆-N₂ позволяют повысить КПД. В тройной смеси He-SF₆-N₂ получен предельный КПД для азотного лазера $\eta_0=0,23\%$.

3. Впервые реализован новый режим работы азотного лазера с двумя или тремя пиками в течение нескольких колебаний тока разряда в смесях SF_6-N_2 при давлении менее 100 мм рт.ст. и He-SF₆-N₂. Показано, что добавки гелия изменяют распределение энергии и спектр лазерного излучения в отдельных пиках. При этом генерация в первом пике может наблюдаться на λ =337 нм, а во втором и третьем пике на λ =357 нм.

4. Показано, что в чистом SF₆ и его смесях с различными газами при давлении до 2 атм. в неоднородном электрическом поле формируется диффузный разряд. При

этом в газовых смесях SF_6 - $H_2(D_2)$ реализуется эффективная генерация на молекулах HF и DF. Получены предельные эффективности генерации на молекулах HF и DF.

6. Созданы нецепные химические HF(DF)-лазеры с накачкой диффузным разрядом, инициируемым пучком УЭ, с КПД до η_{int} =10% при энергии до Q=110 мДж и пиковой мощности излучения более 1 МВт.

7. При максимальных добротностях резонатора за счет высокой электрической мощности, вкладываемой в плазму ОРИПЭЛ и однородности активной среды, в спектре генерации DF лазера появляются слабые линии на полосе P_5 с v=5. Это свидетельствует о создании необходимой концентрации молекул фтора в плазме разряда для протекания «горячих реакций» и достижения инверсной населенности на линиях с v>4.

8. Показано, что в смесях инертных газов с F_2 в системе лезвийных электродов формируется устойчивый диффузный разряд и реализуются длительность импульса излучения и КПД генерации на молекулах XeF*, KrF*, F_2 *, сравнимые с данными параметрами, полученными при накачке XeF*, KrF*, F_2 * лазеров объемными разрядами с предыонизацией.

9. Впервые создан эффективный F_2^* -лазер в ВУФ области спектра на λ =157 нм с накачкой ОРИПЭЛ с КПД до 0,1% и энергией излучения 2 мДж.

10. Исследована возможность получения лазерной генерации в смеси инертных газов в ВУФ области спектра при накачке диффузным разрядом.

Список цитируемой литературы

1*. Palmer A.O. A physical model on the initiation of atmospheric-pressure glow discharges / A.O. Palmer // Appl. Phys. Lett. – 1974. – Vol. 25, № 3. – P. 138–140.

2*. Levatter J.I. Necessary condition for the homogeneous formation of pulsed avalanche discharges at high gas pressures / J.I. Levatter, S.C. Lin // J. Appl. Phys. – 1980. – Vol. 51, No1. – P. 210–222.

3*. Osipov V.V. Self-sustained volume discharge / V.V. Osipov // Physics-Uspekhi. – 2000. – Vol. 43, № 3. – P. 221–242.

4*. Chang T.Y. Improved Uniform-Field Electrode Profiles for TEA Laser and High-Voltage Applications / T.Y. Chang // Rev. Sci. Instrum. – 1973. – Vol. 44, № 4. – P. 405– 407.

5*. Ernst G.J. Compact uniform field electrode profiles / G.J. Ernst // Opt. Communic. – 1983. – Vol. 47, № 1. – P. 47–51.

6*. Белокриницкий Н.С. Влияние неоднородностей предыонизации, электрического поля и концентрации газа на динамику дугообразования в самостоятельном разряде XeCl лазера / Н.С. Белокриницкий, В.Н. Горшков, А.И. Щедрин // ЖТФ. – 1993. – Т. 63, вып. 5. – С. 81–88.

7*. Taylor R.S. Preionization and discharge stability study of long optical pulse duration UV-preionized XeCl lasers / R.S. Taylor // Appl. Phys. B. – 1986. – Vol. 41, N_{2} 1. – P. 1–24.

8*. Kushner M.J. Microarcs as a termination mechanism of optical pulses in electricdischarge-excited KrF excimer lasers / M.J. Kushner // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1991. – Vol. 19, No 2. – P. 387–399. 9*. Mathew D. Current filamentation in discharge-excited F₂-based excimer laser gas mixtures / D. Mathew, H.M.J. Bastiaens, K.-J. Boller, P.J.M. Peters // Appl. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 88, N_{2} 10. – Paper 101502. – 3 p.

10*. Тарасенко В.Ф. Диффузные разряды в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях, инициируемые убегающими электронами / В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, И.Д. Костыря, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка // ЖТФ. – 2010. – Т. 80, вып. 2. – С. 51–59.

11*. Алексеев С.Б. Объемный импульсный разряд в неоднородном электрическом поле при высоком давлении и коротком фронте импульса напряжения / С.Б. Алексеев, В.П. Губанов, И.Д. Костыря, В.М. Орловский, В.С. Скакун, В. Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 2004. – Т. 34, № 11. – С. 1007–1010.

12*. Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases / ed. V.F. Tarasenko. – New York : Nova Science Publishers Inc., 2016. – Vol. 1: Techniques and Measurements. – 405 p.

13*. Runaway Electrons Preionized Discharges / ed. V.F. Tarasenko. – New-York : Electrical Engineering Developments Series, Nova Sciences Publishers, 2014. – 598 p.

14*. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / под ред. В.Ф. Тарасенко. – Томск : STT, 2015. – 568 с.

15*. Бохан П.А. Возбуждение газовых лазеров пучками убегающих электронов / П.А. Бохан, А.Р. Сорокин // ЖТФ. – 1982. – Т. 8, вып. 15. – С. 947–950.

16*. Бельская Е.В. Генерация электронного пучка в открытом разряде с катодной полостью и характеристики Не-Хе-лазера на линии ксенона с λ=2,026 мкм / Е.В. Бельская, П.А. Бохан, Д.Э. Закревский, М.А. Лаврухин // Квант. электрон. – 2010. – Т. 40, № 7. – С. 599–603.

17*. Бельская Е.В. Исследование механизма генерации столкновительного лазера на самоограниченном переходе $2^1P_0^1-2^1S_0$ в атоме гелия / Е.В. Бельская, П.А. Бохан, Д.Э. Закревский, М.А. Лаврухин // Квант. электрон. – 2012. – Т. 42, № 2. – С. 99–106.

18*. Хомич В.Ю. Развитие методов получения пучков убегающих электронов для накачки лазеров, генерирующих УФ-излучение / В.Ю. Хомич, В. А. Ямщиков // Прикладная физика. – 2010. – № 6. – С. 77–88.

19*. Василяк Л.М. Накачка коаксиального азотного лазера высокоскоростной волной ионизации / Л.М. Василяк, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцев, А.С. Родионов // Квант. электрон. – 1995. – Т. 22, № 12. – С. 1207–1209.

20*. Бережной К.В. Излучение полупроводниковой мишени газового диода, возбуждаемой электронным пучком / К.В. Бережной, М.Б. Бочкарев, Г.Л. Даниелян, А.С. Насибов, А.Г. Реутова, С.А. Шунайлов, М.И. Яландин // Квант. электрон. – 2012. – Т. 42, № 1. – С. 34–38.

21*. Азаров А.В. Хе-лазер с накачкой быстрыми электронами, генерируемыми в барьерном разряде / А.В. Азаров, С.В. Митько, В.Н. Очкин // Квант. электрон. – 2002. – Т. 32, № 8. – С. 675–679.

22*. Орловский В.М. Лазер на двуокиси углерода с разрядом, инициируемым пучком электронов в рабочей смеси лазера с давлением до 5 атм. / В.М. Орловский,

С.Б. Алексеев, В.Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 2011. – Т. 41, № 11. – С. 1033– 1036.

23*. Бакшт Е.Х. УФ генерация в азоте при накачке объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин / Е.Х. Бакшт, В.М. Орловский, С.Б. Алексеев, В.Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 2009. – Т. 39, № 12. – С. 1107–1111.

24*. Kumagai H. Output energy enhancement of discharge-pumped XeF(B \rightarrow X) lasers with the two-component halogen donor mixtures / H. Kumagai, M. Obara // IEEE J. Quant. Electron. – 1989. – Vol. QE-25, No 8. – P. 1874–1878.

28*. Атежев В.В. Условия эффективного возбуждения электроразрядного F₂лазера / В.В. Атежев, С.К. Вартапетов, А.Н. Жуков, М.А. Курзанов, А.З. Обидин, В.А. Ямщиков // Квант. электрон. – 2003. – Т. 33, № 8. – С. 677–683.

29*. Бычков Ю.И. Повышение эффективности N_2 лазера / Ю.И. Бычков, В.Ф. Лосев, В.В. Савин, В.Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 1975. – Т. 2, № 9. – С. 2047–2053.

30*. Тарасенко В.Ф. Эффективность азотного УФ лазера с накачкой самостоятельным разрядом / В.Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 2001. – Т. 31, № 6. – С. 489–494.

31*. Iwasaki C. An investigation of the effects of the discharge parameters on the performance of a TEA N₂ laser / C. Iwasaki, T. Jitsuno // IEEE J. Quant. Electron. – 1982. – Vol. 18, No 3. – P. 423–427.

32*. Панченко А.Н. Эффективные режимы генерации НF лазера с накачки нецепной химической реакцией, инициируемой самостоятельным разрядом / А.Н. Панченко, В.М. Орловский, В.Ф. Тарасенко, Е.Х. Бакшт // Квант. электрон. – 2003. – Т. 33, № 5. – С. 401–407.

33*. Панченко А.Н. Об эффективности нецепных электроразрядных HF (DF) – лазеров / А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко // Изв. вузов. Физика. – 2004. – Т. 47, № 5. – С. 93–94.

34*. Rebhan U. High power N₂-laser of long pulse duration / U. Rebhan, J. Hildebrandt, G.A. Skopp // Appl. Phys. A. – 1980. – Vol. 23, N_{2} 4. – P. 341–344.

35*. Martinez A.V. High-efficiency low-pressure Blumlein nitrogen laser / A.V. Martinez, V. Aboites // IEEE J. Quant. Electron. – 1993. – Vol. QE-29, № 8. – P. 2364–2370.

36*. Shao T. Spark discharge formation in an inhomogeneous electric field under conditions of runaway electron generation / T. Shao, V.F. Tarasenko, Ch. Zhang, M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, P.Yan, A.V. Kozyrev, E.Kh. Baksht // J. Appl. Phys. – 2012. – Vol. 111, № 2. – 023304. – 10 p.

37*. Midorikawa K. Efficient operation of a low-impedance Blumlein discharge initiated HF/DF chemical laser / K. Midorikawa, S. Sumida, Y. Sato, M. Obara, T. Fujioka // IEEE J. Quant. Electron. – 1979. – Vol. 15, № 3. – P. 190–194.

38*. Химические лазеры / под ред. Р. Гросса, Дж. Ботта. – М.: Мир, 1980. – 583 с.

39*. Tarasenko V.F. Runaway electrons during subnanosecond breakdowns in highpressure gases / V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, D.V. Beloplotov, D.A. Sorokin // High Voltage. – 2016. – Vol. 1, N_{2} 4. – P. 181–191. 40*. Баранов В.Ю. Параметрические исследования импульсного нецепного НF-лазера / В.Ю. Баранов, Ф.И. Высикайло, А.В. Демьянов, Д.Д. Малюта, В.Ф. Толстов // Квант. электрон. – 1984. – Т. 11, № 6. – С. 1173–1178.

41*. Ерофеев М.В. Об эффективности лазера на смеси H₂-SF₆ при инициировании химических реакций потоком электронов / М.В. Ерофеев, В.М. Орловский, В.С. Скакун, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко // Квант. электрон. – 2000. – Т. 30, № 6. – С. 486–488.

43*. Onkels E.D. Real time measurement of current and voltage in discharge pumped KrF* excimer lasers / E.D. Onkels, W. Seelig // Rev. Sci. Instrum. – 1997. – Vol. 68, № 8. – P. 3250–3251.

44*. Бычков Ю.И. КгF-лазер с накачкой двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем / Ю.И. Бычков, А.Н. Панченко, Е.А. Тельминов, В.Ф. Тарасенко, С.А. Ямпольская, А.Г. Ястремский // Известия ТПУ. – 2008. – Т. 312, № 2. – С. 113–116.

45*. Сорокин Д.А. ВУФ-излучение гетероядерных димеров и его усиление в плазме высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar-Xe / Д.А. Сорокин, М.И. Ломаев., В.Ф. Тарасенко // Опт. атм. и океана. – 2016. – Т. 29, № 5. – С. 437–442.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи 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:

1. Панченко Н.А. Генерация на переходах NeI, ArI и эксиплексной молекулы XeF^{*} при накачке высоковольтным наносекундным разрядом / Н.А. Панченко, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко, П.О. Вильтовский // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8/3. – С. 88–89. – 0,15 / 0,03 а.л.

2. Панченко Н.А. Эффективные лазеры с накачкой диффузным разрядом, формируемым убегающими электронами / Н.А. Панченко, М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/2. – С. 11–13. – 0,15 / 0,03 а.л.

3. Вильтовский П.О. Генерация в УФ, ИК и видимой областях спектра в диффузном разряде, формируемом убегающими электронами лавин / П.О. Вильтовский, М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, **Н.А. Панченко**, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко // Квантовая электроника. – 2013. – Т. 43, № 7. – С. 605–609. – 0,4 / 0,07 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Vil'tovskii P.O. Lasing in the UV, IR and visible spectral ranges in a runawayelectron-preionised diffuse dischrage / P.O. Vil'tovskii, M.I. Lomaev, A.N. Panchenko, **N.A. Panchenko**, D.V. Rybka, V.F. Tarasenko // Quantum Electronics. -2013. $-N_{2}7$. -P. 605–609. 4. Панченко А.Н. Лазеры УФ-, видимого и ИК-диапазонов с накачкой диффузным разрядом, формируемым убегающими электронами / А.Н. Панченко, **Н.А. Панченко**, М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 10. – С. 857–860. – 0,36 / 0,1 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Panchenko A.N. UV, visible, and IR lasers pumped by the diffuse discharge formed by run-away electrons / A.N. Panchenko, N.A. Panchenko, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko // Atmospheric and Oceanic Optics. -2014. -Vol. 27, No 2. -P. 200-203.

5. Ломаев М.И. Спектральные характеристики излучения нецепных HF(DF)лазеров с накачкой объемным разрядом / М.И. Ломаев, А.Н. Панченко, **H.А. Панченко** // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27, № 4. – С. 341–345. – 0,36 / 0,12 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Lomaev M.I. Spectral parameters of nonchain volume-discharge HF(DF) laser radiation / M.I. Lomaev, A.N. Panchenko, N.A. Panchenko // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2014. – Vol. 27, № 4. – P. 339–343. – DOI: 10.1134/S1024856014040101.

6. Панченко А.Н. Эффективные газовые лазеры с накачкой наносекундным диффузным разрядом / А.Н. Панченко, М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, **Н.А. Панченко**, А.И. Суслов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 256–258. – 0,25 / 0,1 а.л.

7. Панченко А.Н. Генерация в смесях инертных газов с фтором при накачке объемным диффузным разрядом / А.Н. Панченко, **Н.А. Панченко** // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 2. – С. 152–156. – 0,38 / 0,2 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Panchenko A.N. Lasing in mixtures of rare gases with fluorine pumped by volume diffuse discharges / A.N. Panchenko, N.A. Panchenko // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2016. – Vol. 29, № 4. – P. 390–394. – DOI: 10.1134/S1024856016040114.

8. Панченко А.Н. Импульсные газовые лазеры с накачкой разрядом, формируемым убегающими электронами / В.Ф. Тарасенко, А.Н. Панченко, **Н.А. Панченко** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 36–39. – 0,45 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Panchenko A.N. Pulsed gas lasers pumped by a runaway electron initiated discharge / A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, **N.A. Panchenko** // Russian Physics Journal. -2017. - Vol. 60, No 8. - P. 1303–1307. - DOI 10.1007/s11182-017-1212-6.

9. Panchenko A.N. Diffuse discharges in SF₆ and mixtures of SF₆ with H₂, formed by nanosecond voltage pulses in non-uniform electric field / A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, D.V. Beloplotov, N.A. Panchenko, M.I. Lomaev // High Voltage. – 2018. – Vol. 3, is. 4. – P. 316–322. – DOI: 10.1049/hve.2018.5006. – 0,85 / 0,17 a.π. (*Web of Science*).

10. Panchenko A.N. Efficient N_2 laser pumped by nanosecond diffuse discharge / A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, **N.A. Panchenko**, A.I. Suslov // Optics

Communication. – 2019. – Vol. 430. – Р. 210–218. – DOI: 10.1016/j.optcom.2018.08.014. – 0,75 / 0,25 а.л. (*Web of Science*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science:

11. Panchenko A.N. Efficient gas lasers pumped by run-away electron preionized diffuse discharge [Electronic resource] / A.N. Panchenko, M.I. Lomaev, **N.A. Panchenko**, V.F. Tarasenko, A.I. Suslov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9255 : 20th International Symposium on High Power Laser Systems and Applications (HPLS and A). Chengdu, China, August 25–29, 2014. – Article number 92552V. – 9 p. – URL: http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.2070212?SSO=1 (access date: 06.06.2019). – DOI: 10.1117/12.2070212. – 0,62 / 0,13 а.л.

12. Panchenko A.N. Gas lasers pumped by run-away electron preionized diffuse discharge [Electronic resource] / A.N. Panchenko, M.I. Lomaev, N.A. Panchenko, V.F. Tarasenko, A.I. Suslov // Proceedings of SPIE. - 2015. - Vol. 9543 : 3rd International Symposium on Laser Interaction with Matter (LIMIS). Nanjing, China, 02-05. November 2014. _ Article number 95432B. 10 p. URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9543/95432B/ Gas-lasers-pumped-by-runaway-electrons-preionized-diffuse-discharge/10.1117/ 12.2085103.full?SSO=1 (access date: 06.06.2019). - DOI: 10.1117/12.2085103. -0,85 / 0,17 а.л.

13. Panchenko A.N. Laser action in runaway electron pre-ionized diffuse discharges [Electronic resource] / A.N. Panchenko, M.I. Lomaev, N. A. Panchenko, V.F. Tarasenko, A.I. Suslov // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9810 : International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XII (AMPL). Tomsk, Russia, September 13–18, 2015. – Article number 981004. – 14 p. – URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/9810/981004/ Laser-action-in-runaway-electron-pre-ionized-diffuse-discharges/10.1117/12.2218049.full (access date: 06.06.2019). – DOI: 10.1117/12.2218049. – 1 / 0,2 а.л.

14. Panchenko A.N. Laser action in the IR, UV and VUV in run-away electron preionized discharges [Electronic resource] / A.N. Panchenko, N.A. Panchenko, D.A. Sorokin, M.I. Lomaev // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10254 : 21st International Symposium on High Power Laser Systems and Applications. Gmunden, Austria, September 05–09, 2016. – Article number 1025411. – 6 p. – URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10254/1025411/ Laser-action-in-the-IR-UV-and-VUV-in runaway/10.1117/12.2256279.full (access date: 06.06.2019). – DOI: 10.1117/12.2256279. – 0,4 / 0,1 а.л.

15. Panchenko A.N. VUV radiation in the plasma of nanosecond discharges initiated runaway electronic [Electronic resource] / A.N. Panchenko, M.I. Lomaev. bv N.A. Panchenko, D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko // Proceedings of SPIE. - 2017. -Vol. 10173 : 4th International Symposium on Laser Interaction with Matter. Chengdu, November 2016. Article China. 06–09, _ number 101731T. 5 p. _ URL: https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10173/1/VUVradiation-in-the-plasma-of-nanosecond-discharges-initiated-by/10.1117/12.2268060.full (access date: 06.06.2019). – DOI: 10.1117/12.2268060. – 0,38 / 0,08 а.л.

16. Panchenko A.N. Run-away electron preionized diffuse discharge as a source of efficient laser emission in the IR, UV, VUV [Electronic resource] / A.N. Panchenko, **N.A. Panchenko**, V.F. Tarasenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 830, is. 1 : 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE 2016). Tomsk, Russia, October 02–07, 2016. – Article number 012001. – 7 p. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/830/1/012001/pdf (access date: 06.06.2019). – DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012001. – 0,5 / 0,2 a.π.

Монографии:

17. Panchenko A.N. Gas lasers pumped by runaway electron preionized diffuse discharge / A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, M.I. Lomaev, **N.A. Panchenko** // Runaway Electrons Preionized Discharges. – New-York, 2014. – Ch. 18. – P. 473–487. – 0,85 / 0,2 a.π. (*Scopus*).

18. Panchenko A.N. Application of run-away electron beams and run-away electron preionized discharges for excitation of gas lasers / A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko, V.M. Orlovskii, **N.A. Panchenko** // Generation of Runaway Electron Beams and X-Rays in High Pressure Gases: Processes and Applications. – New-York, 2016. – Vol. 2, ch. 10. – P. 257–284. – 1,6 / 0,6 а.л. (*Scopus*).

19. Бойченко А.М. Лазеры с накачкой объемными (диффузными) разрядами, формируемыми убегающими электронами / А.М. Бойченко, А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко, А.Н. Ткачев, С.И. Яковленко, **Н.А. Панченко** // Плазменные и газовые лазеры. – Томск, 2017. – Гл. 4. – С. 263–309. – 16,5 / 2,3 а.л.

Публикации в прочих научных журналах:

20. Панченко Н.А. Эффективная генерация в наносекундных диффузных разрядах / Н.А. Панченко, А.Н. Панченко, М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 7/2. – С. 196–200. – 0,5 / 0,15 а.л.

21. Panchenko A.N. Efficient IR, UV and VUV lasers pumped by run-away electron preionized discharge / A.N. Panchenko, **N.A. Panchenko**, D.A. Sorokin, M.I. Lomaev, A.I. Suslov // Журнал прикладной спектроскопии. – 2016. – Т. 83, № 6-16. – С. 572– 573. – 0,2 / 0,05 а.л.

Заказ 432. Тираж 100 экз.

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.