

На правах рукописи

Казанцев Сергей Юрьевич

**ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ НЕЦЕПНЫЕ HF(DF)-ЛАЗЕРЫ,
ИНИЦИИРУЕМЫЕ ОБЪЕМНЫМ САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ
РАЗРЯДОМ**

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Научный консультант:

Аполлонов Виктор Викторович
доктор физ.-мат. наук, профессор

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ

Ломаев Михаил Иванович

доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт сильноточной
электроники Сибирского отделения Российской
академии наук, ведущий научный сотрудник

Рыжков Сергей Витальевич

доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный
технический университет им. Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский
университет)», профессор

Казарян Мишик Айразатович

доктор физико-математических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Физический институт им.
П.Н.Лебедева Российской академии наук,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация

Акционерное общество «Государственный
научный центр Российской федерации Троицкий
институт инновационных и термоядерных
исследований»

Защита диссертации состоится «10» июня 2019 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.063.03 при Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/disser/compet.php>.

Автореферат диссертации разослан “ ____ ” _____ 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.063.03
к.ф.-м.н.



Т.Б. Воляк

тел. +7(499)503-87-77 доб. 147

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Энергетические характеристики химических HF(DF)-лазеров являются рекордными среди всего класса газовых лазеров. Спектральный диапазон, в котором излучают химические HF(DF)-лазеры на цепной реакции, лежит в области 2,6–3,3 мкм для HF-лазера и 3,6–5 мкм для DF-лазера. В этом спектральном диапазоне есть окна прозрачности атмосферы. Поэтому данный спектральный диапазон интересен для задач дистанционного зондирования атмосферы и ряда специальных приложений. Однако применение химических лазеров на цепной реакции сопряжено с большой опасностью для окружающей среды и обслуживающего персонала. Напротив, HF(DF)-лазеры на нецепных реакциях, инициируемых объемным самостоятельным разрядом (ОСР), являются безопасными и значительно более удобными в эксплуатации [1].

Актуальность темы

Сегодня источники мощной лазерной генерации в спектральной области 2,6–5 мкм востребованы в различных областях науки и техники — это дистанционное зондирование атмосферы, разделение изотопов, медицина, специальные применения и т.п. Для этих приложений требуются эффективные лазерные источники с высокими энергией в импульсе, импульсной и средней мощностью. Поэтому разработка физических основ для создания высокоэнергетических эффективных нецепных HF(DF)-лазеров и лазерных комплексов на их основе, излучающих в спектральном интервале 2,6–5 мкм, является чрезвычайно актуальной задачей [2-4].

Основной целью данной работы является поиск новых принципов формирования ОСР для создания высокоэнергетических нецепных HF(DF)-лазеров, а также создание эффективных лазеров с высокими выходной энергией и мощностью излучения в спектральной области 2,6–5 мкм.

Поскольку понимание условий формирования однородного ОСР имеет определяющее значение при создании высокоэнергетических

электроразрядных нецепных HF(DF)-лазеров, в диссертации были поставлены и решены следующие **задачи исследования**.

1. Изучить влияние условий формирования ОСР, газового состава, режима ввода энергии в газ на эффективность и энергию излучения нецепных HF(DF)-лазеров.
2. Исследовать устойчивость и динамику развития ОСР в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера, влияние газового состава и геометрии разрядного промежутка (РП) на характеристики ОСР. На основании проведенных исследований выработать рекомендации к газовому составу и к методике получения ОСР в нецепных HF(DF)-лазерах.
3. Разработать простые и надежные высокоэнергетические широкоапертурные нецепные HF(DF)-лазеры и исследовать их характеристики.
4. Исследовать возможности расширения спектра генерации нецепного HF(DF)-лазера с целью создания мощного источника излучения, перестраиваемого в области 2,6–5 мкм.

Научная новизна работы состоит в исследовании физических основ формирования масштабируемого самоиницирующегося объемного разряда (СИОР) и создании высокоэнергетических широкоапертурных лазерных систем на его основе, а также в создании и исследовании лазеров, работающих на основе кристаллов халькогенидов ZnSe и ZnS, легированных ионами железа, оптически возбуждаемых с помощью нецепного HF(DF)-лазера.

Научная и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в том, что в ней впервые в SF₆ и смесях на его основе выявлена и исследована особая форма объемного разряда – СИОР. Показано, что формирование СИОР в сильно электротрицательных газах происходит вследствие процессов самоорганизации диссипативных структур, представляющих собой диффузные плазменные каналы. Для получения СИОР не требуется предварительной ионизации газа.

Впервые в SF_6 и ряде других сильно электроотрицательных многоатомных газов (например, C_3F_8 , C_2HCl_3 , $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$) экспериментально обнаружен и исследован эффект ограничения плотности тока в диффузном канале, обуславливающий существование такой формы ОСР, как СИОР.

Показано, что при наличии на катоде мелкомасштабных неоднородностей (~ 50 мкм) в SF_6 , C_3F_8 , C_2HCl_3 , $\text{C}_3\text{H}_7\text{I}$ возможно получение СИОР с равномерным распределением энерговклада в объеме РП, что позволяет создавать чрезвычайно простые и компактные лазерные установки.

Впервые предложен новый подход к проблеме получения однородной газоразрядной плазмы в больших объемах, содержащих сильно электроотрицательные газы при средних давлениях, который позволил более чем в 40 раз увеличить энергию генерации нецепных HF(DF)-лазеров, инициируемых ОСР.

Созданы импульсные нецепные HF(DF)-лазеры с рекордными энергетическими характеристиками: $W_{\text{out}} = 410$ Дж на HF и $W_{\text{out}} = 330$ на DF (импульсная мощность $P_{\text{out}} = 1,4$ ГВт на HF и $P_{\text{out}} = 1,1$ ГВт на DF при электрическом КПД 4,3% и 3,4% соответственно).

Впервые получены температурные зависимости критической приведенной напряженности электрического поля $(E/N)_{\text{cr}}$ в недиссоциированном SF_6 и смесях $\text{SF}_6:\text{C}_2\text{H}_6$ в диапазоне температур $T = 300\text{--}2300$ К. Здесь E – напряженность электрического поля, N – концентрация молекул газа в РП.

Впервые созданы мощные лазерные системы, излучающие в спектральном диапазоне 3,7–5 мкм на основе оптически возбуждаемых с помощью нецепного HF(DF)-лазера кристаллов ZnSe и ZnS, легированных ионами железа. Показано, что эффективность преобразования излучения накачки в кристалле $\text{ZnSe}:\text{Fe}^{2+}$ при комнатной температуре составляет $\sim 50\%$.

Результаты работы важны для понимания условий получения объемных разрядов в различных сильно электроотрицательных газах и могут

быть использованы при создании как мощных газовых лазеров, так и плазмохимических реакторов с большими рабочими объемами.

Методы исследований. Основным методом исследований является физический эксперимент. Исследования спектрально-энергетических характеристик лазерных источников проводилось с применением стандартных методик измерения и оценок ошибок эксперимента. Для определения характеристик газоразрядной плазмы осуществлялась регистрация осциллограмм импульсов тока разряда и напряжения на плазме ОСР. Для интерпретации полученных экспериментальных данных использовалось математическое моделирование процессов на основе известных численных моделей [4], моделей, разработанных в лаборатории физики импульсных газоразрядных лазеров ИОФ РАН, и оценочные расчеты.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. В сильно электроотрицательных многоатомных газах SF_6 , C_3F_8 , C_2HCl_3 , C_3H_7I и смесях на их основе проводимость неконтрагированного плазменного канала уменьшается при увеличении электрической энергии, вводимой в канал. В SF_6 и смесях на ее основе уменьшение проводимости неконтрагированного плазменного канала обусловлено совместным действием двух процессов: диссоциацией многоатомных молекул электронным ударом и электрон-ионной рекомбинацией.
2. В сильно электроотрицательных многоатомных газах SF_6 , C_3F_8 , C_2HCl_3 , C_3H_7I и смесях на их основе однородный объемный разряд (даже в условиях сильно неоднородного распределения электрического поля в РП) формируется без использования специальных устройств предыонизации за счет образования большого количества диффузных плазменных каналов и нестационарных самоорганизующихся процессов установления распределения плотности тока в них. Однородность СИОР повышается при использовании катодов с грубой поверхностью, на которой присутствуют микронеровности с характерными размерами 50–100 мкм.

3. Зажигание СИОР в рабочих средах нецепного HF(DF)-лазера позволяет повысить его выходную энергию до величины, более чем на порядок величины превышающую уровень, достигнутый в мире до проведения нашего исследования. Максимальная энергия излучения нецепного HF(DF)-лазера, инициируемого СИОР, линейно растет с энергией, вводимой в рабочий объем при энергозкладах в плазму СИОР, $w_{in}=0,5-2,5$ кДж·л⁻¹·атм⁻¹. Максимальная эффективность преобразования электрической энергии, введенной в плазму объемного разряда, в излучение нецепного HF-лазера превышает 4% при энергии накачки $W_{in} = 0,01-10$ кДж.

4. Применение нецепного электроразрядного HF-лазера для оптической накачки кристаллических структур ZnS:Fe²⁺ и ZnSe:Fe²⁺ позволяет создавать высокоэнергетические лазерные системы, эффективно излучающие в спектральном диапазоне 3,7–5 мкм при комнатной температуре: на поликристаллической структуре ZnSe:Fe²⁺ с энергией в импульсе более 1,5 Дж, импульсной мощностью свыше 6 МВт и эффективностью преобразования 48%; на поликристаллической структуре ZnS:Fe²⁺ с энергией в импульсе 660 мДж и эффективностью преобразования свыше 26%.

5. В диапазоне температур $T = 300-2300$ К приведенная напряженность электрического поля $(E/N)_{cr}$ в недиссоциированном SF₆ и смесях SF₆:C₂H₆ = 5:1 линейно растет с ростом температуры. Рост приведенной напряженности электрического поля $(E/N)_{cr}$ в недиссоциированных SF₆ и C₂HCl₃ при повышении температуры обусловлен увеличением скорости прилипания электронов к колебательно-возбужденным молекулам SF₆ и C₂HCl₃.

6. Нагрев SF₆ и газовых смесей на его основе на 200–2000 К приводит к расслоению ОСР и формированию плазменных неустойчивостей в объеме разряда. Снижение скорости процесса электрон-ионной рекомбинации вследствие локального повышения температуры у вершины плазменного канала, прорастающего из катодного пятна (КП), приводит к контракции разряда в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера.

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов обеспечивается высоким уровнем экспериментальной техники, созданием реально работающих устройств; применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; хорошим согласием результатов, полученных разными методами, а также с имеющимися литературными данными.

Личный вклад диссертанта

Диссертационная работа является результатом многолетней работы автора в ИОФ РАН и представляет собой обобщение работ автора, выполненных совместно с сотрудниками ИОФ РАН. Коллективный характер экспериментальных работ обусловил публикацию полученных результатов в соавторстве с коллегами. Цели и задачи исследования определялись лично автором или при его непосредственном участии. Автор настоящей работы принимал непосредственное участие в разработке методов исследования, проведении экспериментов, создании расчетных программ и обработке полученных результатов. Анализ, обобщение результатов и формулирование выводов работы проводились лично автором.

Все основные результаты работы получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Основные работы выполнены в соавторстве с проф. Аполлоновым В.В. и Фирсовым К.Н., а также с другими сотрудниками Института общей физики РАН (Кононов И.Г., Марченко В.М., Нефедов С.М., Орешкин В.Ф., Подлесных С.В., Сайфулин А.В.), которые принимали участие и оказывали помощь в проведении отдельных исследований. Часть исследований физики разряда в смесях, содержащих сильно электроотрицательные газы, проводились в творческом содружестве с сотрудником ОИВТ РАН Белевцевым А.А. Часть экспериментальных исследований импульсно-периодического режима работы нецепных HF(DF)-лазеров, выполнена совместно с сотрудниками РФЯЦ ВНИИЭФ (Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Зарецкий Н.А., Кодола Б.Е., Комаров Ю.В., Сивачев А.А., Щуров В.В., Юткин И.М.); сотрудниками НПО «ФИД-

техника» (Ефанов В.М., Ефанов М.В., Ярин П.М.) и сотрудниками ФГУП «ГНИИЛЦ РФ «Радуга» (Булаев В.Д., Гусев В.С., Лысенко С.Л. и Познышев А.Н.). Работы по изучению лазерных характеристик поликристаллов ZnSe и ZnS, легированных ионами железа, были выполнены совместно с сотрудниками ИХВВ РАН (Гаврищук Е.М., Иконников В.Б., Котерева Т.В., Можевитина Е.Н., Родин С.А., Савин Д.И., Тимофеева Н.А.), которые предоставляли образцы для исследований и участвовали в анализе и обсуждении результатов работы. Отдельные работы выполнены совместно с сотрудниками НПО АЛМАЗ и «Астрофизика» (Игнатъев А.Б., Феофилактов В.А., Рогалин В.Е.). Во всех случаях использования результатов исследований других авторов в диссертации приведены ссылки на источники информации.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на семинаре отдела колебаний Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и на 29 международных и российских конференциях: International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers (Tomsk, 1999 2001, 2007, 2015г.); Международная конференция по физике плазмы и плазменным технологиям (Минск, 1997, 2000, 2003, 2006, 2009, 2015г.); Конференция по физике газового разряда (Рязань, 1996, 1998, 2000 г и 2002г.); VIII International Conference on Gas Discharge and their Applications, GD-2000; International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High-Power Laser Conference, (1998, 2000, 2004); International Conference High-Power Lasers in Energy Engineering, (Osaka, 1999); Conference on Laser Optics, (St-Petersburg, Russia, 2000, 2010, 2012, 2018); XXV International Conference on Phenomena in Ionized Gases, ICPIG-2001; International Conference on Lasers 96-99, Laser Interaction with Matter International Symposium» (LIMIS 2010), Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, (Звенигород, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014).

Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ гранты: №05-08-33704а, № 06-08-00568а, №06-08-01440а, №06-02-08032-офи, №07-02-00036а, №08-08-00242а, №09-02-00581-а, №09-02-00475-а, №12-08-00321-а, № 15-08-02562, №15-02-06005-а.

Публикации. По материалам диссертации сделано 90 публикаций. Список основных 56 статей приведен ниже, из него 51 статья опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в международную библиографическую базу WoS [A1–A25 и A27–A52]; все статьи [A1–A56] опубликованы в изданиях рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 253 страницы, включая 135 рисунков, 4 таблицы и библиографию из 223 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, сформулированы цель, задачи исследований и основные научные положения диссертационной работы, новизна и практическая ценность полученных в диссертации результатов. Кратко изложено содержание работы по главам.

В первой главе содержится аналитический обзор работ, посвященных проблемам создания высокоэнергетических нецепных электроразрядных HF(DF)-лазеров и возможностям расширения их спектра генерации. Литературный поиск проводился с учетом требований обеспечения высоких значений энергии излучения и эффективности нецепных HF(DF)-лазеров, надежности и простоты их конструкции. Проанализированы составы рабочей среды, на которых достигаются максимальные КПД. Показано, что наиболее эффективным донором F является SF₆ [5], а в качестве донора водорода определенные преимущества дает использование углеводородов [6-8]. На основании литературных данных проанализированы возможность управления спектром генерации HF(DF)-лазера и возможности получения

генерации в более широком спектральном диапазоне. Изучены методы получения ОСР и электрические схемы для их реализации, позволившие достичь максимальных энергетических характеристик нецепных HF(DF)-лазеров. Особое внимание при поиске уделялось возможности масштабирования установок на основе этих методов. На основании проведенного анализа выявлено несколько особенностей формирования ОСР в средах нецепных HF-лазеров и сделан вывод о том, что при создании мощных лазеров традиционные методы осуществления ОСР [9-11], разработанные в основном для CO₂-лазеров с накачкой поперечным разрядом, имеют крайне ограниченное применение в случае электроразрядных HF(DF)-лазеров с большими апертурами. Действительно, традиционный подход к зажиганию ОСР в плотных газах предполагает создание объемной предыонизации газа (УФ, мягкое рентгеновское излучение) с последующим приложением к разрядному промежутку с однородным электрическим полем высоковольтного импульса [9]. В рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера возможности выполнения этих требований ограничены: 1) сильной электроотрицательностью SF₆, обуславливающей большие потери начальных электронов; 2) неэффективностью источников УФ-излучения с энергией кванта выше 10 эВ из-за сильного поглощения УФ-излучения в SF₆. Разработка источников мягкого рентгеновского излучения с большой площадью излучающей поверхности представляет самостоятельную проблему и эти устройства довольно сложны в использовании. Кроме того, дополнительные трудности вызывает низкая устойчивость объемного разряда в SF₆, в связи с чем время ввода электрической энергии в плазму ОСР необходимо делать минимально возможным. Поэтому был предложен альтернативный подход к проблеме увеличения рабочего объема в нецепных HF(DF)-лазерах, инициируемых ОСР. Основное внимание решено было направить на исследование особенностей формирования ОСР в газовых смесях SF₆ с углеводородами при использовании электродов с грубой поверхностью, поскольку в этих условиях, как было обнаружено в [6,7],

возможно получение ОСР без использования специальных устройств предыонизации. В [А3] было показано, что в SF_6 и смесях на его основе, при наличии на поверхности катода мелкомасштабных (~ 50 мкм) неоднородностей, ОСР развивается в форме СИОР, т.е. ОСР без предыонизации газа (в том числе и в РП с высоким краевым усилением электрического поля).

Во второй главе представлены результаты исследования СИОР в газовых смесях на основе SF_6 , из которых следует, что разряд имеет принципиально струйную структуру (представляет собой набор перекрывающихся диффузных каналов). По всем своим характеристикам (внешний вид, осциллограммы тока и напряжения) СИОР не отличается от объемного разряда, полученного с применением предыонизации. На рис.1 показаны характерные осциллограммы тока (канал 1), напряжения (канал 2) на разрядном промежутке, а также фотография СИОР в условиях, когда на разрядный промежуток, образованный плоскими дисковыми электродами из Al, скругленными по краю, разряжался конденсатор. На рис.1б нижний электрод – катод с диаметром плоской части 45 мм.

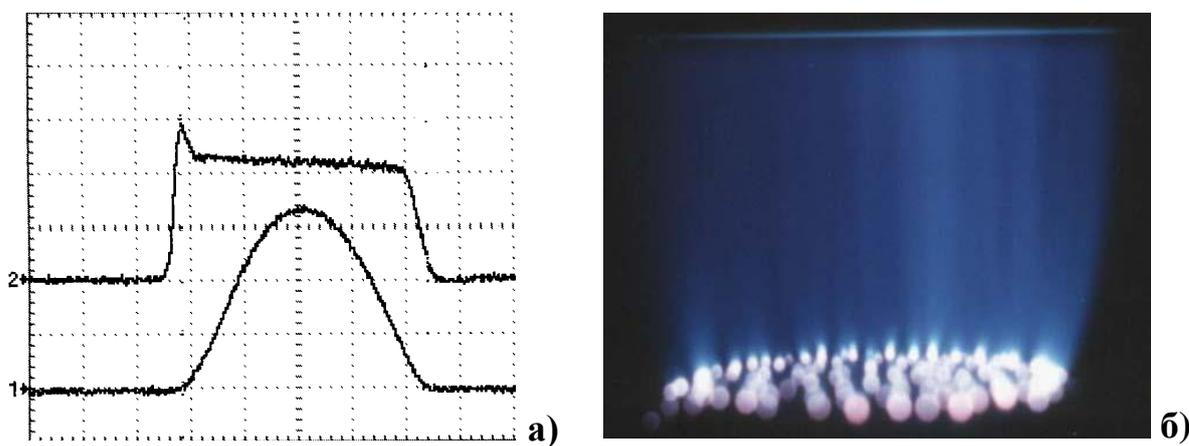


Рисунок 1. а) Типичные осциллограммы тока (нижний луч) и напряжения СИОР (верхний луч). Масштаб: ток 440 А/дел, напряжение 7,7 кВ/дел, развертка 100 нс/дел. б) Фотография СИОР в системе плоских электродов, смесь $SF_6:C_2H_6 = 30:3$ Тор, межэлектродное расстояние $d = 4$ см.

Прямому сравнению характеристик СИОР и объемного разряда, полученного с применением УФ-предыонизации, посвящен раздел 2.1.3

диссертации. Получены зависимости величины предельной энергии W_{lim} , вводимой в плазму объемного разряда, когда ОСР еще остается не контрагированным от длительности разрядного импульса, снятые с УФ-подсветкой РП и без нее. Показано что устойчивость ОСР и количество образующихся диффузных каналов практически не зависят от того, осуществляется или нет УФ-предыонизация разрядного промежутка.

В разделе 2.1.4 представлены результаты исследования устойчивости СИОР в газовых смесях на основе SF_6 , получаемого с применением электродных систем, выполненных из металла или полупроводящих материалов. Установлено, что при одинаковом удельном энергокладе длительность устойчивого горения СИОР в газовых смесях $SF_6:C_2H_6 = 10:1$ значительно выше (более чем в 3 раза), чем в чистом SF_6 и смесях $SF_6:H_2 = 10:1$. Показано, что в рабочих смесях нецепного электроразрядного HF-лазера при заданной длительности импульса тока СИОР применение в электродных системах катодов из SiC с удельным сопротивлением $\rho = 25-50$ Ом·см вместо катода из Cu или Al позволяет увеличить предельный энергоклад в плазму СИОР W_{lim} в 1,2–1,5 раза, а применение анизотропно-резистивных катодов — более чем в 2–3 раза. Однородность СИОР в электродных системах с катодом из объемно-резистивного (анизотропно-резистивного) материала также значительно увеличивается.

Характерные особенности СИОР в сравнении с другими формами объемного разряда проявляются в динамике его развития (раздел 2.1.5 диссертации). На рис. 2 показаны интегральные фотографии СИОР в смеси SF_6 с этаном при формировании в РП прямоугольных импульсов тока заданной длительности. Длительность разряда указана под фотографией. Как видно из рис.2, СИОР зажигается первоначально в зоне максимального усиления электрического поля на краю промежутка (либо в области подсветки катода УФ-излучением) в виде одного или нескольких диффузных каналов. Свечение разряда в остальной части промежутка в этот момент времени не регистрируется. С увеличением длительности импульса

напряжения, прикладываемого к промежутку, СИОР распространяется по промежутку перпендикулярно направлению электрического поля при постоянном напряжении (близком к статическому пробивному в однородном поле). Таким образом, заполнение разрядного промежутка плазмой СИОР происходит посредством образования в пространстве плазменных структур (диффузных каналов, прорастающих из КП).

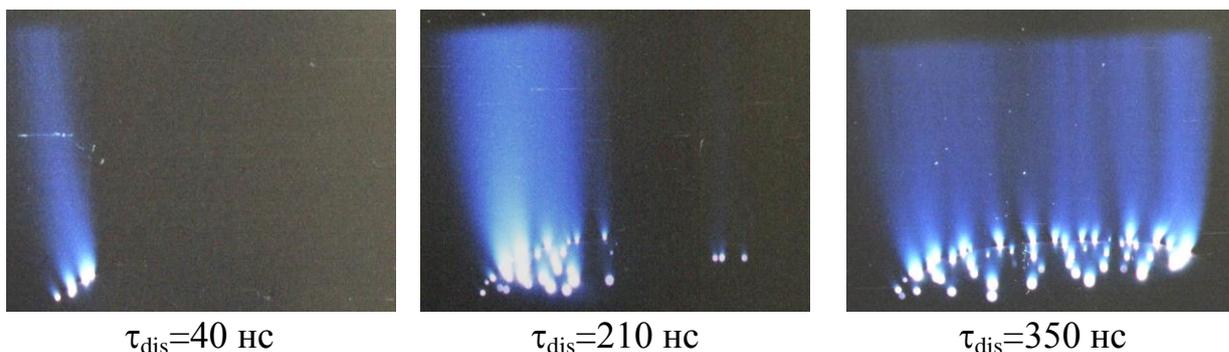


Рисунок 2. Фотографии СИОР в системе плоских электродов, полученных при формировании в разрядном промежутке прямоугольного импульса тока амплитудой ~ 250 А с длительностью τ_{dis} . Смесь $SF_6:C_2H_6 = 10:1$, общим давлением 33 Тор, межэлектродное расстояние $d = 4$ см.

Представленные в разделе 2.1 исследования показывают, что формирование СИОР в SF_6 , C_3F_8 , C_3H_7I , C_2HCl_3 и смесях на их основе происходит вследствие процессов самоорганизации диссипативных структур, представляющих собой диффузные плазменные каналы. Выявленная нами самоорганизация происходит не только в пространстве, но и во времени. Ток, протекающий через канал, не просто воспроизводит общий токовый импульс, а структурирован во времени. Мы обнаружили осцилляции тока в отдельном канале при постоянном общем токе СИОР и напряжении на РП. На рис.3 показана динамика формирования разряда на ножевом катоде, эксперименты выполнены с использованием электронно-оптической камеры с экспозицией кадра 20 нс. На кадрах указано время задержки запуска камеры относительно времени пробоя промежутка. На рис.3 видно, что после принудительного инициирования первого канала по мере ввода энергии образуются новые каналы, а ток, протекающий через первый канал, уменьшается (свечение гаснет). Это явление мы назвали эффектом ограничения плотности тока.

Число структур, которые легко идентифицируются на фотографиях рис.2 и 3, увеличивается пропорционально произведению удельного энерговклада в плазму СИОР на электрическое поле в РП.

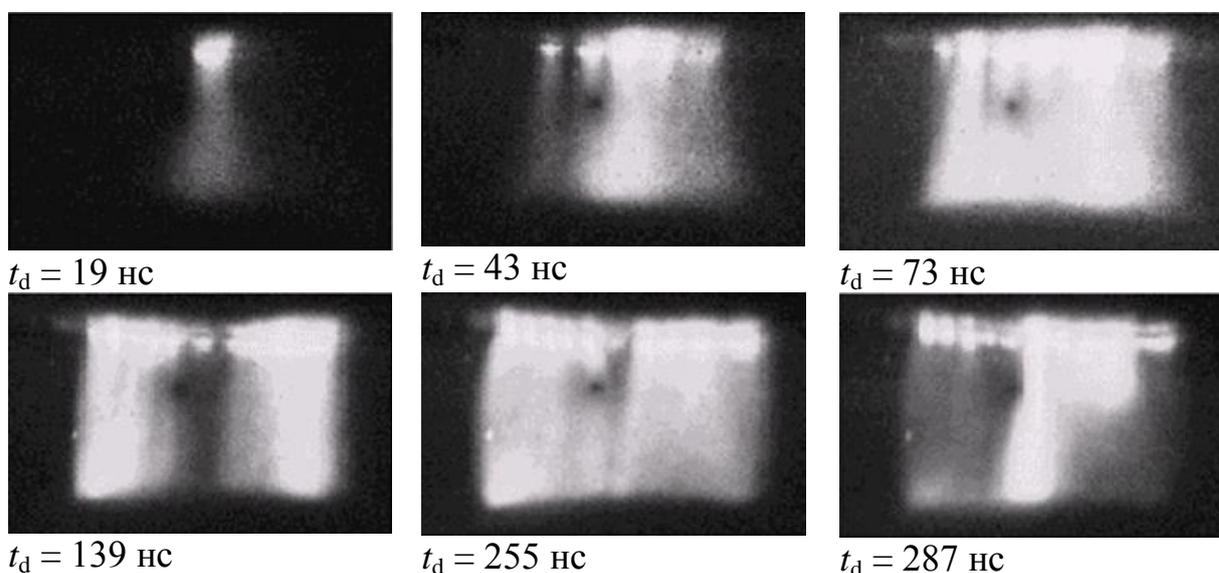


Рисунок 3. Фотографии СИОР со временем экспозиции 20 нс, полученные при фиксированной временной задержке t_d относительно момента пробоя разрядного промежутка.

В разделе 2.1.6 представлены результаты исследований влияния газового состава, материала и структуры поверхности катода на количество образующихся в разрядном промежутке диффузных каналов, привязанных к КП. Установлено, что в системе плоских металлических электродов в широкой области изменения параметров разряда (давление и состав смесей, зарядное напряжение, емкость и индуктивности схемы накачки) число плазменных структур N_s (диффузных каналов) удовлетворяет следующему соотношению:

$$N_s = A + B * W_{in} * U_{qs} / d. \quad (1)$$

Здесь W_{in} – удельный энерговклад в плазму СИОР; U_{qs} – напряжение на разрядном промежутке в квазистационарной стадии горения разряда; d – межэлектродное расстояние, а A и B – константы, зависящие от состава газовой смеси, материала и состояния поверхности катода. Для получения максимально однородного и стабильного по характеристикам разряда желательно поверхность катода обработать на пескоструйной установке с

целью создания на ней микронеровностей с характерным размером ~50 мкм. На основе эктонной модели формирования КП [12, 13] и данных об увеличении тока автоэлектронной эмиссии с участков катода, на которой адсорбируются молекулы углеводородов [12], выведена функциональная зависимость числа КП, образующихся при зажигании СИОР в смеси SF₆:C₂H₆ от парциального давления C₂H₆:

$$N_s \approx N_{sp}^0 + b \cdot K_a \cdot P_{C_2H_6} / (1 + P_{C_2H_6} \cdot K_a). \quad (2)$$

Здесь b и K_a – константы, зависящие от состояния поверхности и материала катода. Экспериментальные зависимости числа КП от парциального давления C₂H₆, полученные на различных электродных системах, с очень хорошей точностью аппроксимируются выражением (2).

В разделе 2.1.7 приведены результаты исследований влияния макроскопических неоднородностей электрического поля на характеристики СИОР в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера. Установлено, что устойчивость СИОР слабо зависит от распределения внешнего электрического поля в РП, определяемого геометрией электродов. Показано, что вся совокупность наблюдаемых особенностей развития СИОР, представленных в разделе 2.1, обусловлена существованием процессов, ограничивающих ток в отдельном канале (эффект ограничения плотности тока).

В разделе 2.2 представлены численные модели, которые позволяют производить расчет характеристик ОСР в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера, а также качественно исследовать динамику формирования СИОР. В разделе 2.2.1 показано, что рассмотрение только лишь процессов ионизации электронным ударом и прилипания электронов без учета таких сложных процессов, как ступенчатая ионизация и т.п., позволяет с хорошей точностью получить реальную ВАХ разряда в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера, инициируемого ОСР. Расчет дает хорошее согласие с экспериментом (погрешность не более 10%) при удельных энергозатратах в плазму СИОР до 150 Дж/л. Для того чтобы численно исследовать наблюдаемую в

эксперименте сложную динамику изменения проводимости диффузных каналов (см. рис. 3) при создании математической модели плазмы СИОР был использован подход, предложенный в [14]. В разделе 2.2.2 на основе разработанной модели численно исследовано влияние на проводимость плазмы различных нелинейных (по концентрации электронов) процессов: отрыва электронов от отрицательных ионов, электрон-ионной рекомбинации и диссоциации SF_6 электронным ударом. Путем сопоставления результатов численного моделирования с экспериментом установлено, что наилучшее согласие расчетных и экспериментальных осциллограмм тока и напряжения на плазме СИОР достигаются, когда процессы отрыва электронов электронным ударом и электрон-ионной рекомбинации практически компенсируют друг друга. Из результатов численного моделирования следует, что наиболее вероятным механизмом, ответственным за ограничение плотности тока в канале СИОР, является диссоциация молекул SF_6 и других компонентов смеси HF(DF)-лазера. В разделе 2.2.3 приводится простая аналитическая модель, которая на качественном уровне демонстрирует влияние процесса диссоциации SF_6 на проводимость диффузного канала. Из этой модели непосредственно следует, что с увеличением удельного энерговлада в плазму локальная проводимость канала достигает локального максимума, а потом уменьшается, что обусловлено ростом локальной концентрации нейтральных частиц, образовавшихся в результате частичной диссоциации SF_6 и увеличением потерь электронов в процессах прилипания.

В третьей главе приводятся результаты исследований плазмы одиночного диффузного канала в SF_6 и смесях SF_6 с H_2 и углеводородами. Обсуждаются общие закономерности формирования ОСП в SF_6 и смесях на его основе. Исследуются механизмы, позволяющие получать СИОР в рабочих смесях HF(DF)-лазера без использования специальных устройств предыонизации. В прямых экспериментах показано, что при увеличении плотности тока, протекающего через диффузный канал, для поддержания

ионизации в газоразрядной плазме требуется более высокое электрическое поле. Величина этого добавочного поля тем выше, чем больше энергии было вложено в плазму канала. Для количественной оценки эффекта ограничения плотности тока предложено использовать величину относительного увеличения напряжения на плазме СИОР по сравнению с напряжением СИОР U_{qs}^0 с удельным энерговладом до $1,5 \text{ Дж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{атм}^{-1}$ (для определенности измеряемое в максимуме тока). На рис.4 приведены зависимости параметра $\Delta = (U_{qs} - U_{qs}^0)/U_{qs}^0$ от $w_{in} = W_{in}/N$, здесь U_{qs} – напряжение на плазме СИОР, измеряемое в максимуме тока, W_{in} – электрическая энергия, введенная до максимума тока в единицу объема РП. Согласно рис. 4, параметр Δ в смеси $\text{SF}_6:\text{C}_2\text{H}_6$ заметно больше, чем в SF_6 и в смесях $\text{SF}_6:\text{H}_2$. В экспериментах было также установлено, что в смесях SF_6 с углеводородами при постоянном w_{in} величина Δ увеличивается с увеличением процентного содержания углеводорода в смеси, причем увеличение (снижение) параметра Δ коррелирует с увеличением (снижением) устойчивости СИОР.

В разделе 3.1 показана явная корреляция величин Δ и w_{in}/α , где α – энергетическая цена образования продуктов диссоциации электронным ударом в SF_6 и смесях на его основе. Это позволило по экспериментальным зависимостям $\Delta(w_{in})$ определить энергетическую цену образования атомов фтора при зажигании ОСР в SF_6 и смесях на его основе, эта величина: $q_F = 5 \pm 1$ эВ. Линейность экспериментальных зависимостей Δ и U_{qs} от w_{in} , хорошее согласие определенного по данным рис. 4 значения энергетической цены образования атома фтора со значениями этого параметра, полученными с использованием других экспериментальных методов [5], непосредственно свидетельствуют в пользу предположения об определяющей роли процесса диссоциации SF_6 и других компонентов рабочих сред НФ-лазера электронным ударом в эффекте ограничения плотности тока.

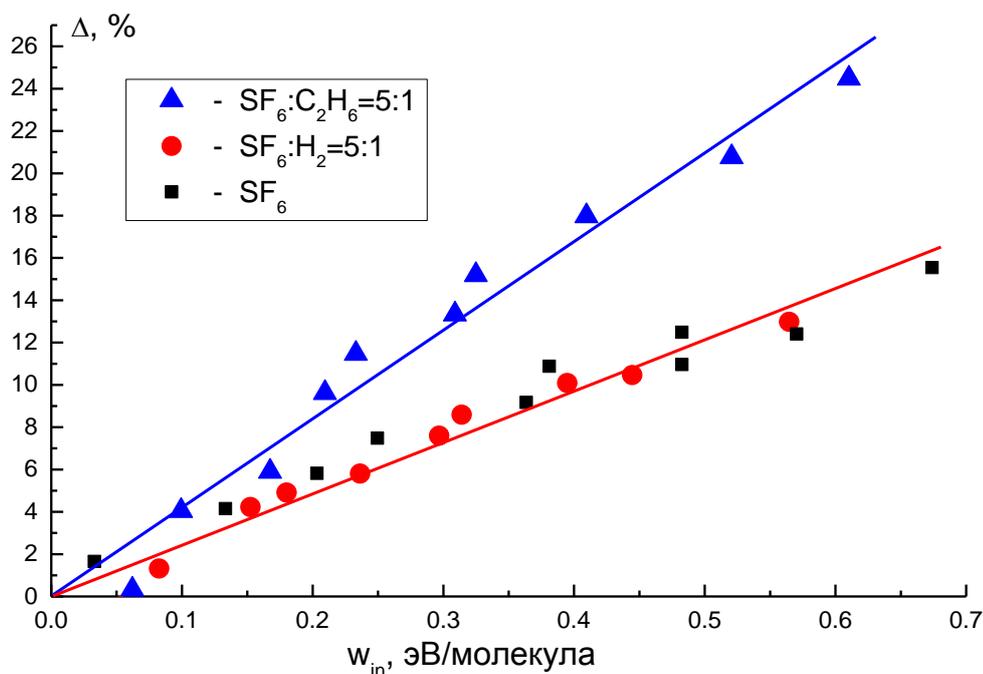


Рисунок 4. Зависимости параметра Δ от w_{in} в SF₆ (■) и в смесях SF₆:C₂H₆ = 5:1(▲) и SF₆:H₂ = 5:1(●).

В разделе 3.2 представлены результаты исследований роли прилипания электронов к колебательно возбужденным молекулам SF₆ в эффекте ограничения плотности тока. Ранее в [14] было показано, что процессы прилипания электронов к колебательно-возбужденным молекулам сильно электроотрицательного газа существенно влияют на характеристики ОСР, в [15] также предполагалось, что аналогичные процессы идут в рабочих средах нецепного HF-лазера и имеют определяющее значение для формирования однородного ОСР в условиях неоднородной предыонизации РП. Поэтому нами проводились прямые экспериментальные исследования влияния колебательно-возбужденных молекул SF₆ на характеристики ОСР. Колебательно-возбужденные молекулы SF₆ в РП нарабатывались в результате облучения газа импульсным ТЕА СО₂-лазером (линия Р20 полосы 10.6 мкм). Обнаружен существенный рост напряжения горения разряда с ростом энергии излучения лазера, поглощаемого молекулами сильно электроотрицательного газа (SF₆ или C₂HCl₃). Показано, что данный эффект обусловлен увеличением скорости потерь электронов в разрядной плазме из-за их прилипания к колебательно-возбужденным молекулам. При прямом

сопоставлении величины увеличения напряжения на плазме ОСР, обусловленного электрической энергией введённой в плазму ОСР, и энергией, запасенной в колебательных степенях свободы, было установлено, что прилипание электронов к молекулам SF_6 , возбуждаемых в колебательные состояния электронным ударом в плазме объемного разряда, не оказывает заметного влияния на баланс заряженных частиц в газоразрядной плазме. Поэтому прилипание электронов к колебательно-возбужденному SF_6 не может служить механизмом, определяющим развитие самостоятельного разряда в сильно электроотрицательных газах в форме СИОР.

В четвертой главе приведены результаты исследований влияния импульсного лазерного нагрева газа на характеристики СИОР в газовых смесях на основе SF_6 и проанализирован процесс развития отлипательной неустойчивости в активных средах электроразрядных нецепных HF(DF)-лазеров вследствие отрыва электронов от отрицательных ионов электронным ударом.

В разделе 4.2. представлены результаты исследования СИОР в SF_6 и смесях на его основе в условиях ударно-волновых возмущений, вызванных нагревом газа в разрядном промежутке импульсным CO_2 -лазером. Обнаружен ряд не наблюдавшихся ранее эффектов, в частности, барьерный эффект и эффект «скольжения» разряда по границе зон нагретого и холодного газа. В прямых экспериментах установлено снижение устойчивости и ухудшение однородности СИОР в рабочих смесях нецепных HF(DF)-лазеров при повышении температуры газа T_g . В разделе 4.3. показано, что $(E/N)_{cr}$ в недиссоциированном SF_6 и смесях $SF_6:C_2H_6$ монотонно увеличивается с ростом T_g за счет увеличения скорости прилипания электронов к колебательно-возбужденному SF_6 . Для чистого SF_6 зависимости $(E/N)_{cr}$ от T_g показана на рис.5.

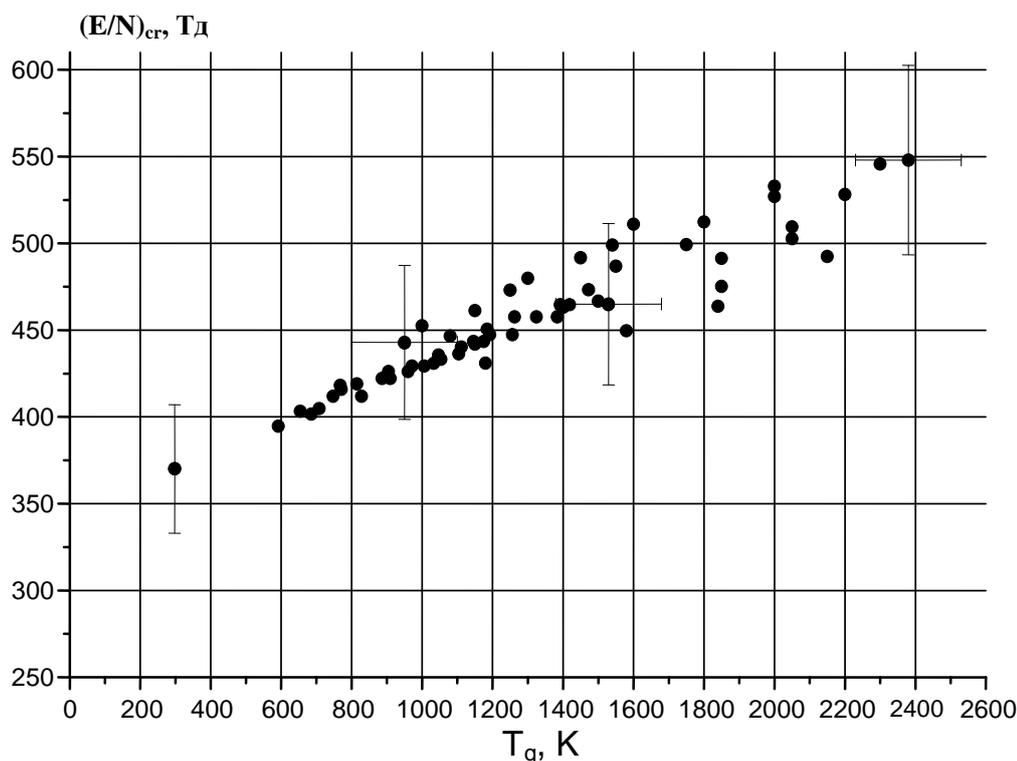


Рисунок 5. Зависимость величины $(E/N)_{cr}$ в SF_6 от температуры.

В разделе 4.4 экспериментально и численно исследован механизм развития плазменных неустойчивостей СИОР в газовых смесях нецепного HF-лазера. Выявлен и описан новый тип неустойчивости ОСР в рабочих смесях нецепного HF-лазера, который отличается от традиционно рассматриваемых механизмов развития неустойчивостей тлеющего разряда повышенного давления [16]. На рис. 6 показаны фотографии СИОР и соответствующие распределения интенсивности свечения в области нагрева, полученные при нагреве газовой смеси до $T_g = 1250$ К (а, г) и 900 К (б, д).

На рис.6 видно, что в газовых смесях на основе SF_6 при повышении температуры СИОР расслаивается, приобретая близкую к периодической токовую структуру. Пространственный период образовавшейся структуры уменьшается с увеличением T_g . При дальнейшем повышении T_g либо плотности разрядного тока в области РП с повышенной температурой формировалась плазменная неустойчивость, типичная фотография которой показана на рис.6в. Путем сопоставления данных эксперимента и результатов численного моделирования СИОР показано, что основным механизмом,

провоцирующим развитие плазменной неустойчивости в рабочих средах нецепных HF(DF)-лазеров, является снижение скорости процесса электрон-ионной рекомбинации из-за роста температуры, который перестает компенсировать рост концентрации электронов в процессе разрушения отрицательных ионов электронным ударом. Такой же тип неустойчивости реализуется в головке искрового канала, прорастающего с электродов в рабочих средах нецепных HF(DF)-лазеров [A25, A28].

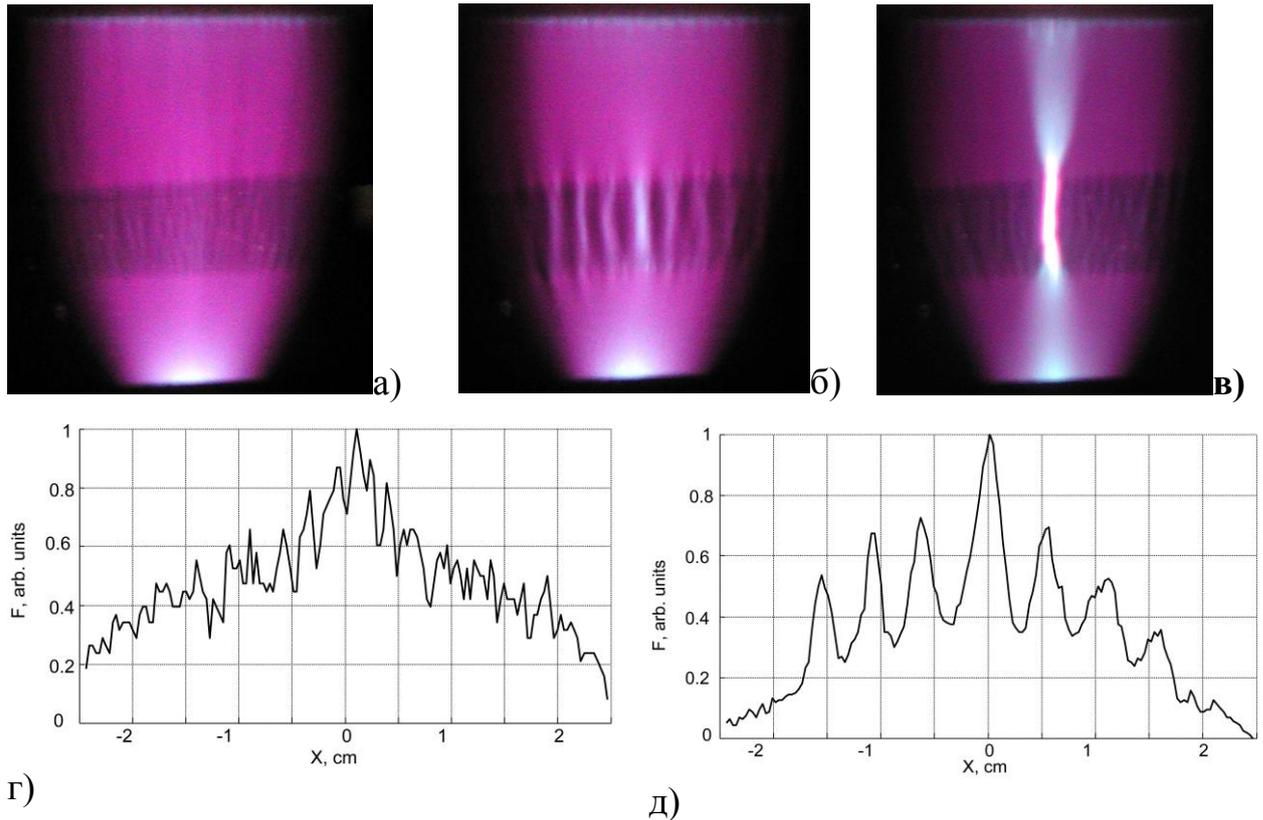


Рисунок 6. Фотографии СИОР при $T_g = 1250$ К (а), 900 К (б), 1350 К (в); распределение интенсивности свечения СИОР при $T_g = 1250$ К (г) и 900 К (д). Смесь $SF_6:Ne:C_2H_6 = 5:5:1$, удельный энерговклад $W_{el} = 0,15$ Дж/см³, $P = 30$ Торр, длительность разряда $\tau_{dis} = 270$ нс.

В пятой главе приводятся результаты исследований характеристик нецепных HF(DF)-лазеров, инициируемых СИОР. В разделе 5.1 обсуждаются проблемы создания электроразрядных нецепных HF(DF)-лазеров с короткой длительностью разрядного импульса. Показано, что при апертурах лазера меньших 5 см и длительностях тока разряда меньше 150 нс кроме обработки поверхности катода (с целью создания на ней микронеровностей ~ 50 мкм)

необходимо применять УФ-подсветку катода, чтобы устранить влияние разброса времени задержки пробоя РП и обеспечить однородное распределение КП по поверхности катода. При этом наличие областей с высоким краевым усилением электрического поля практически не ухудшает устойчивость СИОР. При увеличении апертуры лазера свыше 5 см и длительностях разрядного импульса более 200 нс УФ-подсветка катода уже не нужна. Однородный СИОР с равномерным распределением энерговклада формируется самопроизвольно даже в РП с большим краевым усилением электрического поля. В разделе 5.2. показано, что, несмотря на струйную структуру, качество излучения нецепных HF(DF)-лазеров, инициируемых СИОР, оказывается весьма высоким, что согласуется с результатами, полученными другими исследовательскими группами [17].

Продемонстрирована возможность получения расходимости лазера не превышающей 3-4 дифракционных пределов. В разделе 5.3 показана возможность контроля волнового фронта излучения нецепных HF(DF)-лазеров с помощью методов Тальбо-интерферометрии. Были найдены эффективные экраны и показано, что для регистрации тальбограмм можно использовать стандартные цифровые фото- и видео-камеры видимого диапазона.

В разделе 5.4. обсуждаются проблемы создания нецепных HF(DF)-лазеров килоджоульного уровня и высокоэнергетических импульсно-периодических HF(DF)-лазеров. Фотография СИОР, полученная на лазере с межэлектродным расстоянием 27 см, показана на рис.7а. На этой лазерной установке с разрядным объемом ~60 л, на которой применялись электроды, обработанные на пескоструйной установке без использования источников подсветки, были получены рекордные параметры HF(DF)-лазера: 410 Дж для HF- и 330 Дж для DF-лазера при полном КПД 4.3% и 3.4% соответственно. Это более чем на порядок превосходит все результаты, достигнутые к началу наших исследований. На рис.7б показана зависимость энергии излучения HF-лазера W от энергии, запасаемой в генераторе накачки. На рис. 7б нанесены

точки, полученные на лазерных установках с разными объемами активной среды. Видно, что все эти точки хорошо укладываются на прямо пропорциональную зависимость с электрическим КПД $\sim 4\%$. Это позволяет прогнозировать возможность дальнейшего наращивания выходной энергии нецепных электроразрядных лазеров и создания установок килоджоульного уровня.

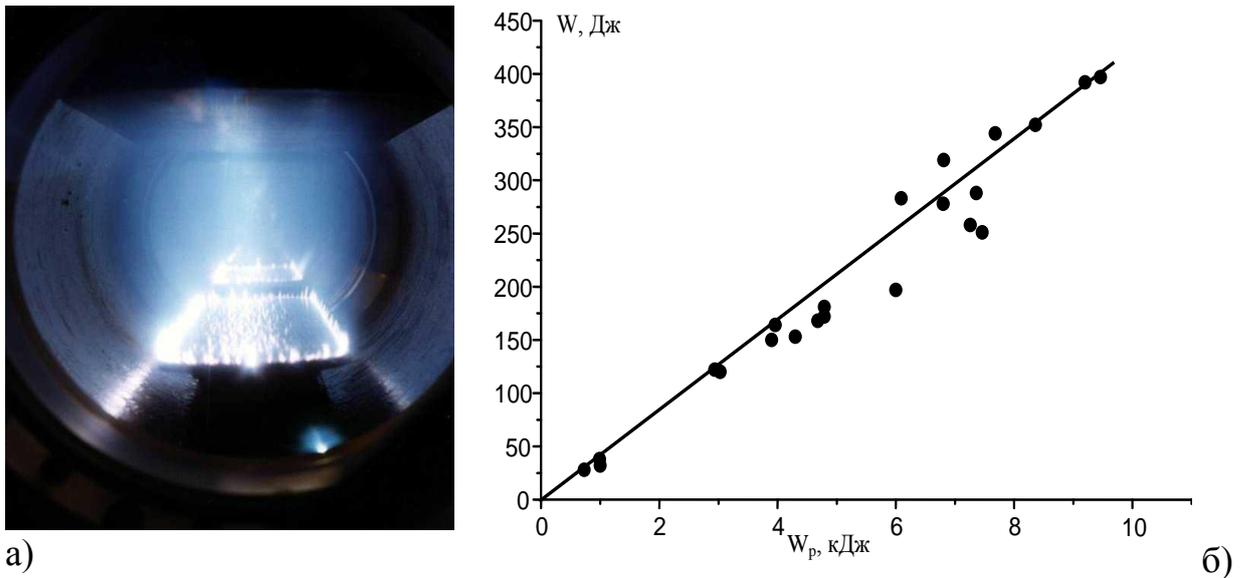


Рисунок 7. а) Фотография СИОР в нецепном HF-лазере, межэлектродное расстояние $d = 27$ см, разрядный объем ~ 60 л. Смесь $SF_6:C_2H_6 = 20:1$ при общем давлении 76 мм рт.ст.; б) зависимость энергии излучения нецепного HF лазера W от энергии W_p , запасаемой в генераторе накачки.

На импульсно-периодической установке [A26] с межэлектродным расстоянием 15 см в смесях $SF_6:C_2H_6 = 20:1$ был реализован СИОР для инициирования нецепной реакции и получена средняя мощность генерации нецепного HF-лазера свыше 1 кВт при частоте следования импульсов 20 Гц.

В разделе 5.5 анализируются возможности применения в высокоэнергетических нецепных HF(DF)-лазерах различных генераторов накачки на основе твердотельных коммутаторов [19]. На примере импульсно-периодического HF(DF)-лазера, инициируемого СИОР с полностью твердотельным генератором накачки на основе ФИД-ключей [20], созданного в ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ [A38], продемонстрирована возможность улучшения эксплуатационных характеристик нецепных HF(DF)-лазеров за

счет применения модульной конструкции генератора накачки, собранного на основе твердотельных коммутаторов.

В шестой главе приводятся результаты исследований, выполненных с применением разработанных нами нецепных HF(DF)-лазеров, а также проанализирована проблема расширения спектрального диапазона генерации нецепных HF(DF)-лазеров в длинноволновую область [8, 21, 22].

В разделе 6.1 дан обзор основных результатов, полученных: при исследовании взаимодействия излучения HF-лазера с поверхностью воды, при применении нецепного HF-лазера для инициирования горения горючих газовых смесей, при исследовании взаимодействия излучения нецепного HF(DF)-лазера с монокристаллическим германием.

В разделе 6.2 представлены результаты применения нецепных HF(DF)-лазеров для создания перестраиваемых в спектральной области 3–5 мкм лазерных излучателей с высокой энергией в импульсе.

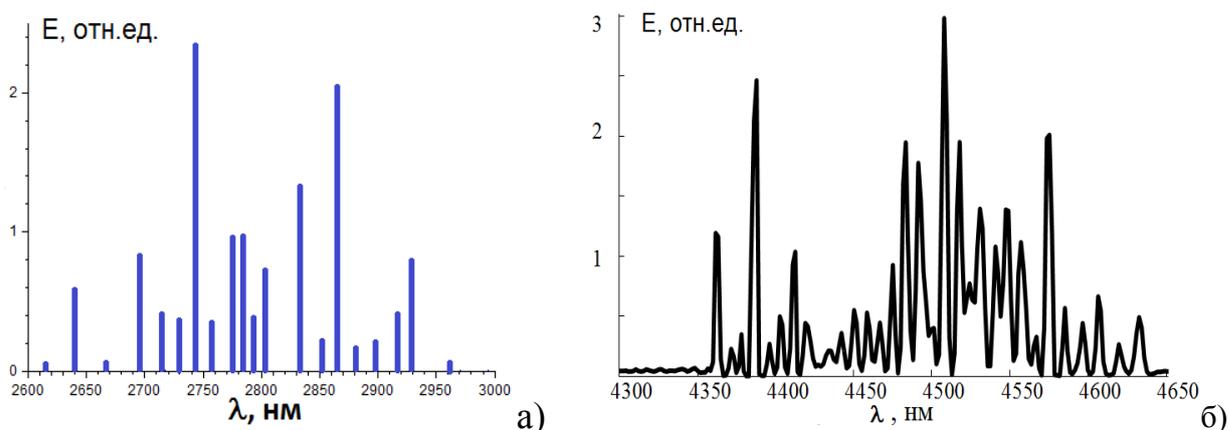


Рисунок 8. Спектры генерации а) нецепного HF-лазера, б) лазера на поликристаллической структуре ZnSe:Fe^{2+} .

На рис.8 показаны типичный спектры генерации нецепного HF-лазера (рис.8а), который использовался в эксперименте для оптической накачки поликристаллических структур ZnSe:Fe^{2+} , и спектр генерации ZnSe:Fe^{2+} лазера (рис.8б), полученный в условиях неселективного резонатора при комнатной температуре. На рис. 9 показаны зависимости выходной энергии $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ - (рис.9а) и $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}$ -лазеров (рис.9б) от поглощенной энергии нецепного HF-лазера, инициируемого СИОР. Как видно на этих графиках,

эффективность преобразования излучения нецепного HF-лазера в поликристаллических халькогенидных структурах очень высокая, несмотря на то что эксперименты проводились при комнатной температуре. Показано, что излучение нецепного HF-лазера позволяет осуществлять эффективную накачку кристаллов ZnSe и ZnS, легированных ионами железа, без использования криогенных систем для охлаждения кристаллов.

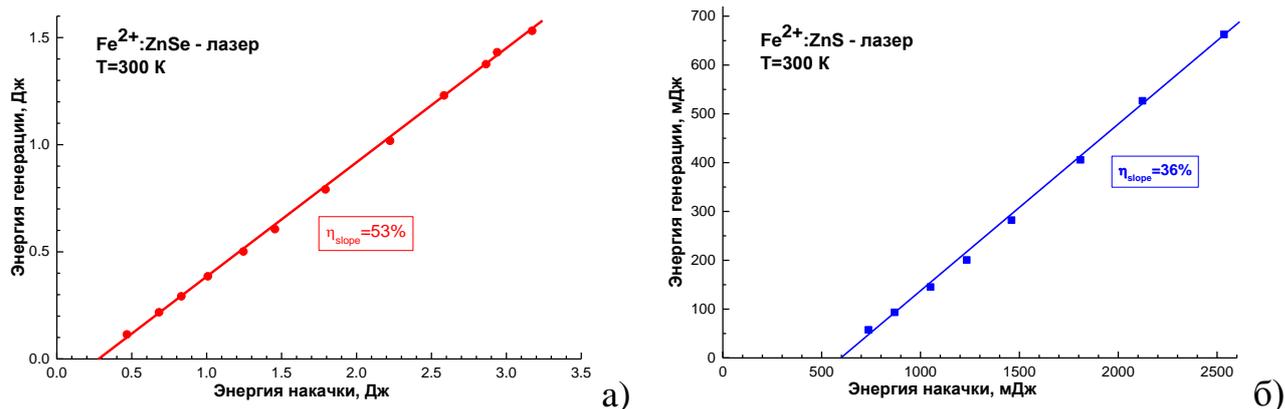


Рисунок 9. Зависимость энергии генерации лазера на поликристаллической халькогенидной структуре от поглощенной энергии HF-лазера: а) ZnSe:Fe²⁺-лазер, б) ZnS:Fe²⁺-лазер.

При комнатной температуре эффективность преобразования излучения нецепного HF-лазера в поликристаллической структуре Fe²⁺:ZnSe может превышать 48%, т.е. достигает предельно возможного КПД при возбуждении кристалла 3-мкм лазерным источником. На основе исследований характеристик лазерных систем на Fe²⁺:ZnSe и Fe²⁺:ZnS, возбуждаемых нецепным HF-лазером, предложены физические основы для отработки технологии изготовления высококачественных халькогенидных активных элементов с большими поперечными размерами, в том числе и для получения активных элементов лазера (спектральный диапазон 3–5 мкм) на основе поликристаллических структур ZnSe и ZnS, легированных ионами железа.

Представлена концепция создания мощных лазерных систем, излучающих в спектральной области 3–5 мкм, на основе импульсно-периодического нецепного HF-лазера.

В заключении перечислены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований были получены следующие основные результаты.

1. Обнаружена новая форма разряда — самоиницирующийся объемный разряд (СИОР), являющаяся формой объемного самостоятельного разряда (ОСР), получаемой без предыонизации в газовых смесях, содержащих сильно электроотрицательные многоатомные газы SF_6 , C_3F_8 , C_2HCl_3 и C_3H_7I . СИОР распространяется по промежутку перпендикулярно направлению приложенного электрического поля посредством образования диффузных плазменных каналов. Формирование СИОР достигается благодаря созданию на поверхности катода мелкомасштабных неоднородностей, значительно усиливающих локальное электрическое поле, и/или УФ-подсветке катода. Однородный по объему разрядного промежутка (РП) энерговклад в плазму СИОР реализуется за счет нестационарных самоорганизующихся процессов установления распределения плотности тока в диффузных каналах.

2. Показано, что эффект реализации СИОР связан с существованием механизмов ограничения плотности тока в диффузном канале. Установлено, что в газовых смесях нецепного HF(DF)-лазера основные физические процессы, обуславливающие данный механизм — это диссоциация SF_6 и других молекулярных компонентов смеси электронным ударом, а также электрон-ионная рекомбинация.

3. Проведены исследования электрических характеристик одиночного плазменного образования (диффузного канала) для количественного измерения эффекта ограничения плотности тока. Установлены критерии для качественной и количественной оценки влияния различных газовых добавок на устойчивость СИОР в газовых смесях на основе SF_6 .

4. Определены электрофизические свойства SF_6 и содержащих его смесей при высоких температурах на основе анализа осциллограмм тока и

напряжения СИОР, зажигаемого в газе предварительно облученном излучением CO₂-лазера. Обнаружен существенный рост напряжения горения разряда с ростом температуры газа. Показано, что данный эффект обусловлен процессом прилипания электронов к колебательно-возбужденным молекулам. Получена температурная зависимость приведенной напряженности электрического поля $(E/N)_{cr}$ в SF₆ в диапазоне температур $T=300-2300$ К.

5. Установлено, что нагрев SF₆ приводит к филаментации разряда и развитию плазменных неустойчивостей в объеме разрядного промежутка, а не с поверхности электродов. Показано, что наиболее вероятным механизмом контракции разряда в рабочих смесях нецепного HF(DF)-лазера является снижение скорости процесса электрон-ионной рекомбинации, который перестает компенсировать рост концентрации электронов за счет процессов их отрыва от отрицательных ионов.

6. Показано, что реализация СИОР позволяет значительно увеличить апертуру и разрядный объем нецепных HF(DF)-лазеров, повысить их надежность и ресурс работы. Созданы импульсные лазеры, инициируемые СИОР с межэлектродным расстоянием 27 см, объемом до 70 л и энергией излучения 410 Дж на HF и 330 Дж на DF с КПД 4,3% и 3,4% соответственно, а также нецепные импульсно-периодические HF лазеры со средней мощностью свыше 1 кВт.

7. Предложены и реализованы высокоэнергетические лазерные системы, работающие на основе оптически возбуждаемых с помощью нецепного HF(DF)-лазера кристаллических структур ZnSe:Fe²⁺ и ZnS:Fe²⁺ и излучающие при комнатной температуре в спектральном диапазоне 3,7–5 мкм. На поликристаллической структуре ZnSe:Fe²⁺ получена энергия 1,53 Дж в спектральном диапазоне 4,3–4,8 мкм при КПД по поглощенной энергии 48%. На поликристаллической структуре ZnS:Fe²⁺ получена энергия 660 мДж в спектральном диапазоне 3,7–4 мкм при КПД по поглощенной энергии 26%.

Публикации автора по теме диссертации

- A1. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. Эффективные нецепные HF(DF)-лазеры с высокими выходными характеристиками // Письма в ЖТФ. – 1996. – Т.22. – №24. – С. 60-63.
- A2. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. Возможности увеличения выходной энергии нецепного HF (DF)-лазера // Квантовая электроника. – 1997. – Т. 24. – №3. – С. 213-215.
- A3. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Фирсов К.Н. Нецепной электроразрядный HF(DF)-лазер с высокой энергией излучения // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – №2. – С. 123-125.
- A4. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Самоиницирующий объемный разряд в нецепных HF-лазерах на смесях SF₆ с углеводородами // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №3. – С. 207-214.
- A5. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Характеристики разряда в нецепном HF(DF)-лазере // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №6. – С. 483-485.
- A6. Аполлонов В.В., Казанцев С.Ю., Орешкин В.Ф., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Объемный самостоятельный разряд для инициирования широкоапертурных нецепных HF(DF)-лазеров // Известия РАН, сер. физическая. – 2000. – Т. 64. - №7. – С. 1439-1443.
- A7. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Ион-ионная рекомбинация в SF₆ и смесях SF₆-C₂H₆ при высоких значениях E/N // Квантовая электроника. – 2001. – Т. 31. – №7. – С. 629-633.
- A8. Аполлонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Особенности развития самоиницирующегося объемного разряда в нецепных HF-лазерах // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – №2. – С. 95-100.

- A9. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Самоиницирующийся объемный разряд в иодидах для наработки атомов йода в кислород йодном лазере // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – №6. – С. 489-492.
- A10. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н. Еще раз о роли УФ-подсветки в нецепных электроразрядных HF(DF)-лазерах // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34. – №2. – С. 111-114.
- A11. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. A self-sustained volume discharge in vibrationally excited strongly electronegative gases // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2004. – V. 37. – №13. – P. 1759–1764.
- A12. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. The influence of vibrational excitation on the burning voltage of a pulsed electric discharge in HF laser working media // Appl. Phys.B. – 2006. – V. 82. – №3. – P. 455-462.
- A13. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Фирсов К.Н. Объемный самостоятельный разряд в смесях газов на основе SF₆ при развитии инициируемых импульсным СО₂-лазером ударно-волновых возмущений среды // Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – №7. – С. 646-652.
- A14. Andreev S.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. and Samokhin A.A. Explosive boiling of water induced by the pulsed HF-laser radiation // Laser Physics. – 2007. – V. 17. - №6. – P. 834-841.
- A15. Andreev S.N., Il'ichev N.N., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kulevskii L.A. and Pashinin P. P. «Generation of an electrical signal upon the interaction of laser radiation with water surface»// Laser Physics. – 2007. – V. 17. – №8. – P. 1041-1052.
- A16. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. On the temperature dependence of the critical reduced electric field in SF₆ and mixtures of SF₆ with C₂H₆ // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – V. 40. - №5. – P. 1368–1375.

- A17. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Фирсов К.Н. Получение температурной зависимости критической напряженности электрического поля в SF₆ и смесях SF₆ с C₂H₆ методом лазерного нагрева газа // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – №10. – С. 985-988.
- A18. Игнатьев А.Б., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Марченко В.М., Феофилактов В.А., Фирсов К.Н. О возможности контроля волнового фронта широкоапертурного HF(DF)-лазера методом тальбот-интерферометрии // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – №1. – С. 69-72.
- A19. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. The critical reduced electric fields in SF₆ at high gas temperatures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V. 41. - №4. – P. 045201.
- A20. Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. Временная структура электрического сигнала при взаимодействии излучения HF лазера с донной поверхностью столба воды // Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – №2. – С. 179-184.
- A21. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. Dynamics of a self-sustained volume discharge in laser-shock-disturbed SF₆-based mixtures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 42. - №11. – P. 115202.
- A22. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. Electron detachment instability and self-organization in strongly electronegative polyatomic gases // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – V. 42. - №21. – P. 215205.
- A23. Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Косый И.А., Тарасова Н.М., Фирсов К.Н. Воспламенение горючей газовой смеси в замкнутом объеме, инициированное свободно локализованной лазерной искрой // Физика плазмы. – 2009. – Т. 35. – №3, – С. 281-288.
- A24. Великанов С.Д., Гаранин С.Г., Домажиров А.П., Ефанов В.М., Ефанов М.В., Казанцев С.Ю., Кодола Б.Е., Комаров Ю.В., Кононов И.Г.,

- Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Щуров В.В., Ярин П.М. Мощный электроразрядный HF-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №5. – С. 393-396.
- A25. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Фирсов К.Н. Отлипательная неустойчивость объемного самостоятельного разряда в активных средах нецепных HF(DF)-лазеров // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №6. – С. 484-489.
- A26. Bulaev V.D., Gusev V.S., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Lysenko S.L., Morozov Yu.B., Poznyshv A.N., Firsov K.N. High power pulse-periodical electrochemical HF laser // Chinese Optics and Applied Optics Abstracts. – 2011. – Т. 4. – №. 1. – С. 26-30.
- A27. Андреев С.Н., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Пашинин П.П., Фирсов К.Н. Генерация электрического сигнала при взаимодействии излучения HF-лазера с донной поверхностью столба воды // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №8. – С. 716-719.
- A28. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Конов И.Г., Лебедев А.А., Подлесных С.В., Фирсов К.Н. К вопросу об устойчивости объемного самостоятельного разряда в рабочих смесях нецепного электрохимического HF-лазера // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №8. – С. 703-708.
- A29. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu, Kononov I.G., Podlesnykh S.V. On the current density limiting effect in SF₆-based mixtures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – V. 44. - №50. – P. 505502.
- A30. Artem'ev K.B., Kazantsev S.Yu., Kononov N.G., Kossyi I.A., Malykh N.I., Popov N.A., Tarasova N.M., Filimonova E.A., Firsov K.N. Nonequilibrium plasma accompanying the ignition of methane-oxygen mixtures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2013. – V. 46. – №5. – P. 055201.
- A31. Великанов С.Д., Данилов В.П., Захаров Н.Г., Ильичев Н.Н., Казанцев С.Ю., Калинушкин В.П., Кононов И.Г., Насибов А.С., Студеникин М.И., Пашинин П.П., Фирсов К.Н., Шапкин П.В., Щуров В.В. Лазер на

кристалле ZnSe:Fe^{2+} с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №2. – С. 141-144.

A32. Гавришук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. Лазер на ZnSe:Fe^{2+} с большой энергией излучения, работающий при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №6. – С. 505-506.

A33. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. and Rodin S.A. Increasing the radiation energy of ZnSe: Fe^{2+} laser at room temperature // Laser Phys. Lett. – 2014. – V. 11. – №8. – P. 085001.

A34. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Maneshkin A.A., Mishchenko G M, Nefedov S.M., Rodin S.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A., Zotov E.A. Spectral and temporal characteristics of a ZnSe:Fe^{2+} laser pumped by a non-chain HF(DF) laser at room temperature // Laser Phys. Lett. – 2014. – V. 11. – №12. – P. 125004.

A35. Гавришук Е.М., Иконников В.Б., Казанцев С.Ю., Кононов И. Г., Родин С.А., Савин Д.В., Тимофеева Н.А., Фирсов К.Н. Масштабирование энергетических характеристик лазера на поликристалле ZnSe:Fe^{2+} при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №9. – С. 823-827.

A36. Artem'ev K.V., Berezhetskaya N.K., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kossyi I.A., Popov N.A., Tarasova N.M., Filimonova E.A., Firsov K.N. Fast combustion waves and chemi-ionization processes in a flame initiated by a powerful local plasma source in a closed reactor // Philosophical Transactions A. – 2015. - V. 373. - № 2048. – P. 20140334.

A37. Великанов С.Д., Домажиров А.П., Зарецкий Н.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Кромин А.А., Подлесных С.В., Сивачев А.А., Фирсов К.Н., Харитонов С.В., Цыкин В.С., Щуров В.В., Юткин И.М. Мощный импульсно-периодический HF(DF)-лазер с твердотельным генератором накачки // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №11. – С. 989-992.

- A38. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rodin S.A., Savin D.V., Timofeeva N.A. High-energy room-temperature Fe²⁺:ZnS laser // Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – №1. – P. 015001.
- A39. Firsov K.N., Frolov M.P., Gavrishchuk E.M., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Korostelin Yu.V., Maneshkin A.A., Velikanov S.D., Yutkin I.M., Zaretsky N.A. and Zotov E.A. Laser on single-crystal ZnSe:Fe²⁺ with high pulse radiation energy at room temperature // Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – №1. – P. 115002.
- A40. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. Energy and spectral characteristics of a room-temperature pulsed laser on a ZnS:Fe²⁺ polycrystal // Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – №4. – P. 145004.
- A42. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V. and Timofeeva N.A. Room-temperature laser on a ZnSe:Fe²⁺ polycrystal with undoped faces, excited by an electrodischarge HF laser // Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – №5. – P. 055002.
- A42. Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V. and Timofeeva N.A. Room-temperature laser on a ZnS:Fe²⁺ polycrystal with a pulse radiation energy of 0.6 J // Laser Phys. Lett. – 2016. – V. 13. – №6. – P. 065003.
- A43. Великанов С.Д., Зарецкий Н.А., Зотов Е.А., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Коростелин Ю.В., Манешкин А.А., Фирсов К.Н., Фролов М.П., Юткин И.М. Лазер на ZnSe:Fe²⁺ с энергией излучения 1.2 Дж при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №1. – С. 11-12.
- A44. Dormidonov A.E., Firsov K.N., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Kotereva T.V., Savin D.V., Timofeeva N.A. High-efficiency room-temperature ZnSe:Fe²⁺ laser with a high pulsed radiation energy // Applied Physics B. – 2016. – V. 122. – P.211.

- A45. Великанов С.Д., Дормидонов А.Е., Зарецкий Н.А., Казанцев С.Ю., Козловский В.И., Кононов И.Г., Коростелин Ю.В., Манешкин А.А., Подмарьков Ю.П., Скасырский Я.К., Фирсов К.Н., Фролов М.П., Юткин И.М. Лазер на монокристалле ZnS:Fe^{2+} , возбуждаемый при комнатной температуре электроразрядным HF-лазером // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46. – №9. – С. 769-771.
- A46. Gavrishuk E., Ikonnikov V., Kotereva T., Savin D., Rodin S., Mozhevitina E., Avetisov R., Zyкова M., Avetissov I., Firsov K., Kazantsev S., Kononov I., Yunin P. Growth of high optical quality zinc chalcogenides single crystals doped by Fe and Cr by the solid phase recrystallization technique at barothermal treatment // Journal of Crystal Growth. – 2017. – V.468. – P.655–661.
- A47. Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Sirotkin A.A., Gavrishchuk E.M., Ikonnikov V.B., Rodin S.A., Savin D.V., Timofeeva N.A. CVD-grown $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ polycrystals for laser applications // Laser Phys. Lett. – 2017. – V. 14. – №5. – P. 055805.
- A48. Зотов С.Д., Казанцев С.Ю., Кудрявцев Е.М., Кузнецов А.А., Лебедев А.А., Фирсов К.Н. Измерение показателя преломления в волне, возбуждаемой в воде лазерным импульсом // ПТЭ. – 2017. – № 6. – С. 83–89.
- A49. Alekseev E.E., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G., Rogalin V.E. Nonlinear Absorption of Non-Chain HF Laser Radiation in Germanium // Physics of Wave Phenomena. – 2017. – V. 25. – № 4. – P. 280–288.
- A50. Gavrishuk E., Zyкова M., Mozhevitina E., Avetisov R., Ikonnikov V., Savin D., Firsov K., Kazantsev S., Kononov I., Avetissov I. Investigations of nanoscale defects in crystalline and powder ZnSe doped with Fe for laser application // Phys. Status Solidi A. – 2017. – V. 215. – № 4. – P. 1700457.
- A51. Алексеев Е.Е., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Рогалин В.Е., Фирсов К.Н. Двухфотонное поглощение излучения нецепного HF-лазера в

монокристаллах германия // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124. – №6. – С. 790-794.

- A52. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Kononov I.G., Podlesnykh S.V. Self-sustained volume discharge in mixtures of SF₆ with hydrocarbons, hydrogen and deuterium for non-chain HF(DF) lasers // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. V. 51. - № 38. – P. 384003.
- A53. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Oreshkin V.F. High-power nonchain HF (DF) lasers initiated by self-sustained volume discharge // Proceedings of SPIE. – 1998. – V. 3574. – P. 374-384.
- A54. Apollonov V.V., Firsov K.N., Kazantsev, S.Y., Oreshkin V.F. High-power SSD-based pulse nonchain HF(DF) laser // Proceedings of SPIE. – 1998. – V. 3343. – P. 783-788.
- A55. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. Self-initiated volume discharge in mixtures of SF₆ with hydrocarbons to excite nonchain HF lasers // Proceedings of SPIE. – 2000. – V. 4071. – P. 31-43.
- A56. Apollonov V.V., Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Saifulin A.V. Scaling up of nonchain HF(DF) laser initiated by self-sustained volume discharge // High-Power Lasers in Energy Engineering. – International Society for Optics and Photonics, 2000. – V. 3886. – P. 370-382

Список цитированной литературы

1. Basov N.G., Bashkin A.S., Igoshin V.I., Oraevsky A.N., Shcheglov V.A. Chemical Lasers. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. – 370 с.
2. Apollonov V.V. High-Energy Molecular Lasers. – Springer, – 2016. – 445 с.
3. Apollonov V.V. / Simulation of High Conductivity Channels in Space // High-Conductivity Channels in Space. – Springer, Cham, 2018. – С. 95-115.
4. Кузенов В.В., Лебо А.И., Лебо И.Г., Рыжков С.В. Физико-математические модели и методы расчета воздействия мощных лазерных и плазменных

импульсов на конденсированные и газовые среды. 2-е изд. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 328 с.

5. Гордон Е.Б., Матюшенко В.И., Репин П.Б., Сизов В.Д. Энергетическая цена образования атомов фтора в импульсном электрическом разряде // Химическая физика. – 1989. – Т. 8. – № 9. – С. 1212.

6. Wlodarczyk G. A Photopreionized Atmospheric Pressure HF Laser // IEEE J. Quantum Electronics. – 1978. – V. 14. – P. 768-771.

7. Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. Химический импульсный HF-лазер на смеси технического C_3H_8 с SF_6 , инициируемый электрическим разрядом // Квантовая электроника. – 1983. – Т. 10. – № 2. – С. 441-443.

8. Баранов В.Ю., Высикайло Ф.И., Демьянов А.В., Малюта Д.Д., Толстов В.Ф. Параметрические исследования импульсного нецепного HF-лазера // Квантовая электроника. – 1984. – Т. 11. – № 6. – С. 1173-1179.

9. Месяц А.Г., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. - М.: Наука, 1991. – 272 с.

10. Осипов В.В. Самостоятельный объемный разряд // УФН. – 2000. – Т. 170. - №3. – С. 225-245.

11. Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. Основы создания систем электроразрядного возбуждения мощных CO_2 , N_2 и F_2 -лазеров. – М.: Физматлит, 2015. – 168 с.

12. Месяц Г.А. Эктоны // УФН. – 1995. – Т. 165. - №6. – С. 601-626.

13. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Автоэмиссионные и взрывные процессы в газовом разряде. – Н.: Наука, 1982. – 256 с.

14. Демьянов А.В. Кочетов И.В., Напартович А.П., Капителли М., Лонго С. Влияние колебательной кинетики HCl на развитие микронеустойчивостей и характеристики электроразрядного XeCl-лазера в условиях неоднородной предыонизации // Квантовая электроника. – 1995. – Т.22. – №.7. – С. 673-682.

15. Бычков Ю.И., Горчаков С.Л., Ястремский А.Г. Однородность и устойчивость объемных электрических разрядов в смесях газов на основе SF_6 // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №. 8. – С. 733-737.

16. Напартович А.П., Старостин А.Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления // Химия плазмы. Под.ред. Б.М. Смирнова. М.: Атомиздат. – 1979 – С. 153-208.
17. Напартович А.П., Старостин А.Н. Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления // Химия плазмы. Под.ред. Б.М. Смирнова. М.: Атомиздат. – 1979 – С. 153-208.
18. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д., Воронов С.Л., Воронин В.В., Запольский А.Ф., Золотов М.И., Кириллов Г.А., Мищенко Г.М., Подавалов А.М., Селемир В.Д., Урлин В.Д., Фролов Ю.Н., Цибереv В.П. Электроразрядный DF-лазер с энергией в импульсе порядка 10 Дж // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №. 3. – С. 225-228.
19. Jiang W., Yatsui K., Takayama K., Akemoto M., Nakamura E., Shimizu N., Tokuchi A., Rukin S., Tarasenko V., Panchenko A. Compact solid-state switched pulsed power and its applications // Proceedings of the IEEE. – 2004. – V. 92. – №. 7. – P. 1180-1196.
20. Efanov V.M., Karavaev V.V., Kardo-Sysoev A.F., Tchashnikov I.G. Fast ionization dynistor (FID)-a new semiconductor superpower closing switch // Digest of Technical Papers. 11th IEEE International Pulsed Power Conference (Cat. No. 97CH36127). – IEEE, 1997. – V. 2. – P. 988-991.
21. Галь А.В., Русанов В.Д., Ширяевский В.Л., Шолин Г.В. Спектральные характеристики излучения импульсного химического HF-лазера с электронно-пучковым инициированием на смеси SF₆-HI-H₂ // Квантовая электроника. – 1992. – Т. 19. – № 11. – С. 1055–1057.
22. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А. Спектральные характеристики излучения нецепных HF(DF)-лазеров с накачкой объемным разрядом // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. - №4. – С. 341-345.