

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.063.03 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 10 июня 2019 г., протокол № 213

О присуждении КАЗАНЦЕВУ СЕРГЕЮ ЮРЬЕВИЧУ, гражданину РФ, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Высокоэнергетические нецепные HF(DF) лазеры, инициируемые объемным самостоятельным разрядом» по специальности 01.04.21–Лазерная физика принята к защите «04» марта 2019 г. № протокола 205 диссертационным советом Д 002.063.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (119991 Москва, ул. Вавилова, 38, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.).

Соискатель Казанцев Сергей Юрьевич 1971 года рождения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика» «Широкоапертурные нецепные HF(DF) лазеры, инициируемые объемным самостоятельным разрядом» защитил в 2002 году в диссертационном совете Д 002.063.02, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (получен диплом кандидата наук КТ № 086291 от 17 января 2003 г.). В настоящее время Казанцев С.Ю. работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Диссертация выполнена в отделе колебаний Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.

Научный консультант — д-р физ.-мат. наук, профессор Аполлонов Виктор Викторович, заведующий отделом мощных лазеров Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук,

Официальные оппоненты:

Ломаев Михаил Иванович, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических излучений, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук;

Рыжков Сергей Витальевич, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры теплофизики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)»;

Казарян Мишик Айразатович, д-р физ.-мат. наук, профессор, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник отдела люминесценции им. С.И. Вавилова Отделения оптики, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Акционерное общество «Государственный научный центр Российской федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» в своем положительном заключении, подписанном Напартовичем Анатолием Петровичем, д-ром физ.-мат. наук,

профессором, главным научным сотрудником лаборатории кинетики и оптики низкотемпературной плазмы, и утвержденном Генеральным директором АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», д-ром техн. наук Марковым Дмитрием Владимировичем, указала, что выполненная на высоком научном уровне диссертационная работа С.Ю. Казанцева удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает искомой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21–Лазерная физика.

В отзыве указаны следующие замечания.

1. В работе не полностью нашел отражение вопрос современных тенденций в области создания альтернативных лазерных излучателей в спектральном диапазоне 2–5 мкм.
2. Уделено недостаточно внимания исследованию спектрально-временных зависимостей импульса генерации нецепных HF(DF)-лазеров, а также лазеров на кристаллах  $ZnSe:Fe^{2+}$  ( $ZnS:Fe^{2+}$ ) с оптической накачкой нецепным HF-лазером.
3. В диссертации подробно описаны исследования низкотемпературной плазмы газовых смесей на основе  $SF_6$ , но практически не рассматривались другие газы в качестве донора атомов фтора.
4. Кроме того, имеются определенные, редакционные, погрешности в оформлении текста и рисунков диссертации. Так на стр.40 диссертации, где на рис. 2.1. приводятся схемы разрядных промежутков, первые два рисунка приведены не полностью: на схемах не показан анод. Для удобства восприятия рис.2.2 нужно было разместить сразу после рис.2.1. На рис.2.9 нет точек с УФ-подсветкой. На стр. 76 уравнение (2.9) эквивалентно уравнению (2.7) и должно быть выкинуто из системы уравнений. На рис.3.1 на экспериментальных осциллограммах не указано, какая из них соответствует току, а какая напряжению. Для обозначения разных физических переменных иногда используется одна и та же буква, например,  $T$  в первых главах диссертации используется для обозначения длительности

разрядного импульса, а позже этой же буквой обозначается и температура газа, и величина пропускания кристаллов.

Соискатель имеет 90 опубликованных работ по теме диссертации, из них 56 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Список наиболее значительных работ:

1. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Yu., Kononov I.G. The critical reduced electric fields in SF<sub>6</sub> at high gas temperatures // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2008. – V. 41. - №4. – P. 045201.
2. 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.
3. Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Конов И.Г., Лебедев А.А., Подлесных С.В., Фирсов К.Н. К вопросу об устойчивости объёмного самостоятельного разряда в рабочих смесях нецепного электрохимического HF-лазера // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №8. – С. 703-708.
4. 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<sup>2+</sup> с накачкой излучением нецепного электроразрядного HF-лазера при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №2. – С. 141-144.
5. Гаврищук Е.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Родин С.А., Фирсов К.Н. Лазер на ZnSe:Fe<sup>2+</sup> с большой энергией излучения, работающий при комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2014. – Т. 44. – №6. – С. 505-506.
6. Гаврищук 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<sup>2+</sup> при

комнатной температуре // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №9. – С. 823-827.

7. 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.

8. 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:Fe<sup>2+</sup> laser with a high pulsed radiation energy // Applied Physics B. – 2016. – V. 122. – P.211.

9. 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.

10. Belevtsev A.A., Firsov K.N., Kazantsev S.Y., Kononov I.G., Podlesnykh S.V. Self-sustained volume discharge in mixtures of SF<sub>6</sub> with hydrocarbons, hydrogen and deuterium for non-chain HF(DF) lasers // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. V. 51. - № 38. – P. 384003.

На автореферат поступили отзывы:

- от Селезнева Леонида Владимировича, д-ра физ.-мат. наук, доцента, старшего научного сотрудника лаборатории газовых лазеров ОКРФ ФИАН. Отзыв положительный. Замечания: из автореферата видно, что в диссертационной работе основное внимание уделено исследованию физики газового разряда и химическим HF(DF)-лазерам на нецепной реакции, инициируемой объемным разрядом. В то же время перспективному и многообещающему методу оптической накачки этими лазерами кристаллических структур ZnSe:Fe и ZnS:Fe, получению генерации и достижению на них высоких энергетических характеристик посвящен всего

один раздел 6.1 главы диссертации, хотя в публикациях автора более четверти работы посвящены именно этим исследованиям. Кроме того, из автореферата неясно место этих работ автора в мировом сообществе — что сделано до него, что здесь является новым. Замечание не снижает ценности работы и ее положительной оценки.

- от Каплунова Ивана Александровича, д-ра техн. наук, профессора, заведующего кафедрой прикладной физики, проректора по научной и инновационной деятельности Тверского государственного университета. Отзыв положительный. Замечания: 1) в работе значительное внимание уделено исследованию физики газового разряда, при этом исследованию лазеров на кристаллических структурах ZnSe:Fe и ZnS:Fe посвящен всего один раздел 6.1 главы диссертации; 2) в автореферате не приведены данные о стабильности энергетических параметров и ресурсе работы нецепных HF(DF)-лазеров, инициируемых объемным разрядом. Представленные замечания не снижают ценности работы.

- от Панченко Алексея Николаевича, д-ра физ.-мат. наук, старшего научного сотрудника Института сильноточной электроники СО РАН. Отзыв положительный, но возникли некоторые вопросы относительно проведенных исследований.

1) На стр. 4 и 6 автореферата вводятся термины «самоорганизация диссипативных структур», «нестационарные самоорганизующиеся процессы», которые затем никак не описываются. По моему мнению, автору следовало бы кратко описать физическую суть данных терминов.

2) На рис. 6 непонятно, в каком месте разрядного промежутка снято распределение интенсивности свечения объемного разряда.

3) В автореферате диссертационной работы содержится ряд неточностей. Например, в первом защищаемом положении написано «В SF<sub>6</sub> и смесях на ее основе». Принято писать «на его основе». Однако данные замечания не могут повлиять на высокую оценку данной диссертационной работы.

- от Ямщикова Владимира Александровича, д-ра техн. наук, члена-корреспондента РАН, директора Филиала Института электрофизики и электроэнергетики РАН. Отзыв положительный, но есть замечания:

1) из третьей главы автореферата неясно, проводилось ли прямое измерение зависимости проводимости в канале (например в канале с иницирующего разряд электрода) СИООР от величины удельного энерговклада, подтверждающее эффект ограничения плотности тока; 2) в разделе 5.4 сообщается о создании нецепного HF-лазера со средней мощностью генерации более 1 кВт и частотой следования импульсов 20 Гц. Для импульсно-периодических лазеров важной характеристикой является ресурс работы газовой смеси, но сведений о ресурсе в автореферате не приводится. Как проявление множества диффузных макроканалов и катодных пятен в разряде может сказываться на ресурсе работы HF(DF)-лазеров? Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают положительной оценки автореферата диссертационной работы.

- от Осипова Владимира Васильевича, члена-корреспондента РАН, профессора, заслуженного деятеля науки РФ. Отзыв положительный. Замечания: в тексте автореферата часто встречаются сокращения и аббревиатуры, что затрудняет чтение. Из автореферата диссертации видно, что в работе значительное внимание уделено исследованию физики газового разряда, при этом исследованию лазеров на кристаллических структурах ZnSe:Fe и ZnS:Fe посвящен всего один раздел 6-й главы диссертации, в автореферате не приводятся данные спектрально-временных характеристик излучения исследуемых лазеров, а также данные о стабильности энергетических параметров и ресурсе работы нецепных HF(DF)-лазеров, иницируемых объемным разрядом.

- от Тарасенко Николая Владимировича, члена-корреспондента НАН Беларуси, зав. центром «Физика плазмы» Института физики НАН Беларуси. Отзыв положительный. Замечаний нет

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается известностью их работ в области лазерной физики и высокой степенью научного авторитета, обусловленного компетентностью и значимостью их работ.

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие научные результаты.

Обнаружен и исследован новый вид объемного самостоятельного разряда — самоиницирующийся объемный разряд. Определены условия и границы существования разрядов данного вида. На основе самоиницирующегося объемного разряда решена проблема увеличения энергии и средней мощности генерации нецепных HF(DF)-лазеров. Созданы нецепные химические HF- и DF-лазеры с самыми высокими на сегодня значениями энергии в импульсе (410 и 330 Дж соответственно). Экспериментально определена величина приведенной критической напряженности электрического поля в недиссоциированном SF<sub>6</sub> в температурном интервале от 300 до 2400 К и указаны причины противоречия литературных данных, полученных различными исследовательскими группами. Созданы мощные лазерные системы на основе кристаллических структур Fe<sup>2+</sup>:ZnSe и Fe<sup>2+</sup>:ZnS, для накачки которых применены нецепные HF(DF)-лазеры. На этих структурах при комнатной температуре получена эффективная лазерная генерация в спектральном диапазоне 3,7–5,0 мкм.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в сильно электроотрицательных многоатомных газах SF<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>HCl<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>I и смесях на их основе обнаружено снижение проводимости неконтрагированного плазменного канала при увеличении электрической энергии, вводимой в канал. В SF<sub>6</sub> и смесях на его основе уменьшение проводимости неконтрагированного плазменного канала обусловлено совместным действием двух процессов: диссоциацией многоатомных молекул



электронным ударом и электрон-ионной рекомбинацией. Установлено, что нагрев  $SF_6$  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 нецепных HF(DF)-лазеров является снижение скорости процесса электрон-ионной рекомбинации, который перестает компенсировать рост концентрации электронов за счет процессов их отрыва от отрицательных ионов.

Научная новизна диссертации заключается в следующем.

Исследованы физические основы формирования масштабируемого самоиницирующегося объемного разряда и созданы высокоэнергетические широкоапертурные лазерные системы на его основе. Созданы и исследованы лазеры, работающие на основе оптически возбуждаемых с помощью нецепных HF(DF)-лазеров кристаллов халькогенидов ( $ZnSe$  и  $ZnS$ ), легированных ионами железа.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается следующим.

Созданы высокоэнергетические импульсные нецепные HF(DF)-лазеры, возбуждаемые самоиницирующимся объемным разрядом с апертурой  $\approx 30$  см, а также нецепные импульсно-периодические HF-лазеры со средней мощностью  $\approx 1$  кВт. Показано, что применение нецепного электроразрядного HF-лазера для оптической накачки кристаллических структур  $ZnS:Fe^{2+}$  и  $ZnSe:Fe^{2+}$  позволяет создавать высокоэнергетические лазерные системы, эффективно излучающие в спектральном диапазоне 3,7–5,0 мкм при комнатной температуре.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты экспериментов, расчетов и моделирования согласуются с имеющимися

