

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИОФ РАН,
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук



Гарнов Сергей Владимирович

« 5 » марта 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук на диссертацию **Панченко Юрия Николаевича** «Энергетические, временные, пространственные и спектральные характеристики излучения в перестраиваемых ХеСl - и КrF-лазерных источниках», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертационная работа Ю.Н. Панченко посвящена изучению физических процессов, определяющих однородность и устойчивость объемного разряда в газовых средах ХеСl - и КrF-лазеров, и возможности формирования в таких средах мощных лазерных импульсов с высокой временной и пространственной когерентностью. Стимулом для развития данного научного направления явилось то, что к началу выполнения представляемой работы параметры имеющихся электроразрядных ХеСl - и КrF-лазеров существенно уступали теоретически достижимым характеристикам. В основном, это связано со сложностью зажигания объемного разряда в эксимерных газовых смесях, а, именно, с развитием ионизационных неустойчивостей, которые не только снижают энергию и длительность импульса излучения, но и не позволяют формировать высококогерентное излучение. В то же время эксимерные лазеры остаются наиболее мощными источниками излучения в УФ-диапазоне спектра, что и определяет их востребованность во множестве научных исследований и практических приложений, а также стимулирует поиски путей улучшения их выходных характеристик.

Таким образом, **новизна и актуальность** диссертационной работы Ю. Н. Панченко не вызывают сомнений.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, приложения и списка цитируемой литературы из 301 наименования. Объем диссертации составляет 280 страниц, 158 рисунков и 4 таблицы.

Во введении сформулированы цели и задачи исследований, обоснована актуальность работы, представлены защищаемые положения и указаны их научная новизна, а также научная и практическая значимость.

В первой главе представлен краткий обзор работ, посвященный основным научным направлениям диссертации, которые включают создание активной среды в электроразрядных эксимерных лазерах, формирование высококогерентного излучения в KrF- и XeCl-лазерах и лазерных системах на их основе, формирование излучения в двухпроходных и регенеративных усилителях с обращением волнового фронта (ОВФ) при вынужденном рассеянии Мандельштама-Бриллюэна (ВРМБ), изучение оптических свойств молекул Kr_2F^* в эксимерных газовых смесях.

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной аппаратуры и методик экспериментов, численных расчетов и измерений. Представлены особенности конструкций и параметры разработанных электроразрядных XeCl- и KrF-лазеров серии EL, а также разнообразные лазерные системы на их основе. Приведены характеристики длинноимпульсных XeCl-лазеров с накачкой разрядом и электронным пучком, входящих в широкоапертурную (~ 40 см) XeCl-лазерную систему с выходной энергией более 300 Дж (пучок высокого качества).

В третьей главе описаны результаты экспериментальных и численных исследований формирования разряда в XeCl- и KrF-лазерах при длительности полупериода разрядного тока от 15 до 40 нс и скорости нарастания тока $\sim 7 \times 10^{12}$ А/с. Показано, что в таких условиях горения разряда оптимальная по ряду параметров величина удельной мощности накачки составляет 3-5 МВт/см³. Установлено, что в электроразрядном KrF-лазере при удельной мощности накачки более 6 МВт/см³ возможно получение рекордной величины удельной энергии излучения 9,5 Дж/л при КПД лазера по мощности 5,8 % и по энергии не менее 3,8 %. Достигнутые экспериментальные результаты с хорошей точностью совпадают с результатами, полученными в численных расчетах XeCl- и KrF-лазеров. Также представлены результаты экспериментальных и численных исследований условий устойчивого горения разряда в XeCl-лазере с длительностью импульса накачки 300 нс. Установлено, что при удельной мощности накачки выше критической величины, $P_{\text{кр}} \approx 5 \times 10^{-2} / t_{\text{имп}}$ (Вт/см³), где

$t_{\text{имп}}$ — длительность импульса накачки, в разрядной плазме развиваются различные виды неоднородностей.

В четвертой главе рассматриваются условия формирования качественного излучения в ХеСl- и КrF-задающих генераторах при изменении условий взаимодействия формирующегося излучения с активной средой лазера и механизма селекции дисперсионного резонатора с линейными и нелинейными оптическими элементами. Приводятся физические методы управления энергетическими, временными, пространственными и спектральными характеристиками формирующегося излучения в малоапертурном дисперсионном резонаторе задающего генератора.

Пятая глава посвящена исследованиям формирования когерентного высокоэнергетического излучения в широкоапертурных КrF- и ХеСl-лазерных системах. Рассмотрены различные методы и оптические схемы создания каскадных усилительных лазерных систем, а также многопроходные оптические схемы в широкоапертурных единичных лазерных модулях. Показано, что основной причиной, приводящей к искажению волнового фронта усиливаемого пучка, являются амплитудные неоднородности активной среды. Продемонстрировано, что использование в лазерных системах режима прямого усиления позволяет в более широком диапазоне управлять спектральными и пространственными параметрами излучения, в отличие от метода инжекционной синхронизации. Определены условия использования электроразрядных ХеСl-усилителей в широкоапертурной ХеСl-лазерной системе с длительностью импульса излучения более 200 нс.

В шестой главе приводятся результаты исследований ОВФ при ВРМБ пучка ХеСl-лазера с длительностью импульса 80 нс и расходимостью $5 \cdot 10^{-6}$ рад. Показано, что использование в качестве нелинейной среды гептана позволяет работать только с длительностью импульса накачки не более 15 нс и величиной относительного отверстия фокусирующей оптической системы $D/F \leq 1/80$. Данные ограничения вводятся из-за наличия двухфотонного поглощения в таких средах. Продемонстрировано, что для достижения требуемых параметров рассеянного импульса в качестве нелинейной среды необходимо использовать SF₆.

Седьмая глава посвящена исследованиям условий создания в электроразрядной плазме активной среды на молекулах Кr₂F*. Показано, что интенсивность флуоресценции молекул Кr₂F* существенно возрастает при замене в газовой смеси буферного газа Ne на Ar. Данный эффект объясняется тем, что скорости конверсии димеров в трехатомные молекулы с участием Ar и

Kr на 4 порядка выше, чем с Ne. Получена хорошая точность совпадения экспериментальных и численных результатов. Впервые продемонстрировано, что в диффузном разряде, горящем в газовой смеси со фторидами, возможно создание активной среды на трехатомных молекулах Kr_2F^* с коэффициентом усиления $g = (g_0 - \alpha) = 3,14 \times 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, где α – коэффициент поглощения.

В заключении представлены основные результаты и общие выводы диссертационной работы.

Научная новизна, научная ценность и практическая значимость проведенного исследования.

1. Предложен метод зажигания квазиоднородного разряда в газовой среде KrF-лазера, позволяющий достичь удельной энергии излучения лазера (10 Дж/л), близкой к теоретически допустимой, при высоком КПД (4 %).
2. Обнаружено, что формирующиеся в разряде XeCl-лазера пространственно распределенные диффузные каналы имеют высокую устойчивость горения и обладают свойствами активной среды.
3. Определены условия зажигания однородного объемного разряда в длинноимпульсном ($\geq 200 \text{ нс}$) XeCl-лазере, при которых возможно усиление излучения с расходимостью, близкой к дифракционному пределу ($\sim 10^{-5} \text{ рад}$).
4. Впервые продемонстрирована возможность применения ОВФ при ВРМБ для излучения XeCl-лазера, имеющего расходимость $5 \times 10^{-6} \text{ рад}$ и длительность импульса 80 нс.
5. Впервые определены условия создания в газоразрядной плазме активной среды на трехатомных молекулах Kr_2F^* .
6. Разработаны эффективные (КПД $\sim 4 \%$) электроразрядные XeCl- и KrF-лазеры серии EL со средней мощностью излучения до 100 Вт и рекордной удельной энергией импульса генерации 5 и 9,5 Дж/л соответственно.
7. Разработаны различные широкоапертурные XeCl- и KrF-лазерные системы, позволяющие управлять характеристиками формирующегося излучения в следующих диапазонах:
 - энергия пучка 0.01–330 Дж;
 - длительность импульса 0.1–250 нс;
 - расходимость до $5 \times 10^{-6} \text{ рад}$;
 - ширина спектральной линии 10^{-4} –2,4 нм;
 - частота срабатывания – от одиночного импульса до 100 Гц.

8. Впервые в лидарной системе, работающей по методу ЛФ/ЛИФ для обнаружения паров и следов высокоэнергетических материалов в атмосфере, использовалось узкополосное излучение электроразрядного KrF-лазерного источника.

Внедрение результатов работы и предложения по их использованию.

С участием автора были созданы и внедрены электроразрядные эксимерные лазеры, а также результаты исследований по формированию в них высококогерентного излучения в следующие организации: Институт оптики атмосферы СО РАН (г. Томск, 2005 г.); Институт электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург, 2006 г.); Институт физики СО РАН (г. Красноярск, 2008 г.); Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск, 2010 г.); Иркутский филиал института лазерной физики СО РАН (г. Иркутск, 2014 г.); Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН (г. Бийск, 2009–2012 гг.); Шеньянский технологический университет (КНР, г. Шеньян, 2004 г.); Северо-западный ин-т ядерных технологий (КНР, г. Сиань, 2004 г.).

Реализация результатов работы. Диссертационная работа выполнялась в рамках фундаментальных научных исследований в соответствии с планами госбюджетных заданий в лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН в период 2002–2018 гг., а также при проведении работ, поддержанных различными грантами РФФИ, РНФ, ФНИ и договорами с российскими и зарубежными компаниями и организациями.

Достоверность научных положений и других результатов работы. Достоверность положений подтверждается воспроизводимостью получаемых результатов на различных экспериментальных установках, применением общепринятых методик и стандартных поверенных измерительных приборов для измерения электрических параметров электроразрядных лазеров и характеристик лазерного и рассеянного излучения.

Публикации. По материалам диссертации Ю. Н. Панченко опубликовано 54 работы, включая 27 публикаций в журналах из списка ВАК, и входящих в базы данных Web of Science, Scopus, 1 монография, получено 8 патентов. Представленные результаты докладывались на международных конференциях.

Замечания по диссертационной работе.

1. В выводах гл. 6, подчеркивается, что регистрировалось двухфотонное поглощение в гептане и гексане, однако в тексте отсутствует описание экспериментальных исследований с гексаном.

2. Для определения величины удельной энергии или мощности, вложенной в разряд, необходимо знать напряжение на плазме, автор же приводит измерение напряжения на конденсаторе, расположенном вблизи разрядного промежутка. Также не совсем понятно, как измерялся поперечный размер разряда. Очевидно, что данный параметр может меняться в процессе ввода энергии в плазму.
3. В представленной работе отмечается, что эксперименты по зажиганию разряда и усилению узкополосного излучения в активной среде проводились на импульсно-периодических ХеСl- и КrF-лазерах, однако автор не раскрывает влияния газовых потоков в разрядном промежутке на условия горения разряда и характеристики лазерного излучения.
4. При наличии большого списка организаций, в которых были внедрены разработанные лазеры, диссертантом не уделено должного внимания обсуждению их возможного использования для развития новых технологий.
5. Отсутствует нумерация формул на стр. 41 и 164.
6. Присутствуют стилистические ошибки в тексте, см., например, на стр. 83 *...колебательный ввод энергии в разряд*, стр. 189 *...насыщенного режима активной среды*.
7. Присутствуют синтаксические ошибки в тексте, см., например, на стр. 7, 203, 227.

Отмеченные недостатки не снижают уровня выполненного диссертационного исследования в целом и не оказывают влияния на высокую научную значимость полученных автором результатов.

Заключение

На основании полученных диссертантом результатов, сделанных выводов и выдвинутых научных положений следует считать, что поставленная цель исследований успешно достигнута. Диссертация Ю.Н. Панченко «Энергетические, временные, пространственные и спектральные характеристики излучения в перестраиваемых ХеСl - и КrF-лазерных источниках» является научно-квалификационной работой и соответствует критериям ВАК (п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней»), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор, Юрий Николаевич Панченко, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – «Лазерная физика».

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание, а опубликованные работы раскрывают основные положения диссертационного исследования.

Отзыв обсужден на расширенном заседании лаборатории физики импульсных газоразрядных лазеров отдела колебаний и одобрен на заседании Ученого совета отдела колебаний ФГБУН Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, протокол № 263 от 5 марта 2019 г.

Заведующий лабораторией
физики импульсных газоразрядных лазеров отдела колебаний ИОФ РАН,
доктор физико-математических наук,
(специальность 01.04.21–лазерная физика)

Фирсов Константин Николаевич



5 марта 2019 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт общей физики им. А. М. Прохорова
Российской академии наук,
Адрес: 119991, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 38
Тел.: +7 (499) 503-87-34
E-mail: office@gpi.ru
Сайт: <http://www.gpi.ru>