

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации **Панченко Юрия Николаевича** «*Энергетические, временные, пространственные и спектральные характеристики излучения в перестраиваемых ХеСl- и КrF-лазерных источниках*», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Актуальность исследования. Диссертация Панченко Ю. Н. направлена на решение следующих актуальных задач:

- на изучение физических процессов устойчивого горения диффузного разряда в электроразрядных ХеСl- и КrF-лазерах, обеспечивающих одновременное достижение высокой удельной энергии излучения лазера и его КПД;
- на выявление закономерностей формирования мощных лазерных импульсов излучения с высокой степенью когерентности в этих лазерах;
- на разработку частотных генераторов и лазерных систем на основе полученных результатов.

Актуальность работы подтверждается поддержкой отдельных работ по тематике диссертации РФФИ, РНФ, ФНИ СО РАН, контрактами.

Содержание работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений (А, Б).

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цели и задачи исследований, сформулированы кратко основные результаты работы, научная новизна, научная и практическая значимость, защищаемые положения.

В первой главе представлен краткий обзор имеющихся в литературе работ по тематике диссертационных исследований, приведен анализ результатов этих работ, выявлены направления исследований для повышения выходных характеристик лазерного излучения. В частности: установление и реализация условий зажигания устойчивого горения объемного разряда в эксимерных плотных газах, методов формирования когерентного излучения в малоапертурных дисперсионных резонаторах ХеСl- и КrF-лазеров и широкоапертурных лазерных системах на их основе, формирование активной среды на молекулах Kr_2F^* .

Во второй главе описаны аппаратура и методики использованные в экспериментальных исследованиях, приведены параметры разработанных лазеров и лазерных систем, представлены 0-мерные численные модели ХеСl- и КrF-лазеров.

В третьей главе представлено описание результатов экспериментальных и численных исследований импульсно-периодических электроразрядных ХеСl- и КrF-лазеров серии ЕL с энергией излучения в диапазоне 0,1–1,0 Дж. Показано, что в электроразрядном ХеСl- лазере с удельной мощностью накачки в диапазоне 3-5 МВт/см³ и длительностью импульса полупериода тока разряда 15 – 40 нс в объемном разряде возникают различные неустойчивости, образование которых определяется соотношениями парциальных давлений ксенона и галогена. Найдены условия, при которых при зажигании множества диффузных макроканалов в разрядной плазме активная среда сохраняет усиливающие свойства в течение всей длительности накачки. Использование полученных закономерностей зажигания устойчивого горения разряда в эксимерных средах при высоких удельных мощностях накачки позволило разработать компактные электроразрядные ХеСl- и КrF-лазеры серии ЕL с рекордной удельной энергией импульсов излучения 10 и 9,5 Дж/л соответственно и КПД от вложенной в разряд энергии ~ 4 %.

Четвертая глава диссертации содержит описание результатов исследований формирования когерентного излучения в малоапертурных ХеСl- и КrF-генераторах в условиях нелинейного взаимодействия формирующегося светового потока с активной средой вблизи порога генерации. Показано, что использование в задающем генераторе активной среды на

основе разрядной плазмы, состоящей из множества диффузных макроканалов, позволяет формировать излучение с рекордными по совокупности характеристиками: длительность импульса – 60 нс, энергия излучения – 1 мДж, ширина спектральной линии $\sim 0,01 \text{ см}^{-1}$, качество пучка $M^2 \sim 1.1$. Обнаружен эффект нелинейной спектральной селекции излучения в дисперсионном резонаторе ХеСl-лазера, обусловленный существованием неоднородностей в контуре усиления активной среды. Показано, что использование этого эффекта в ХеСl-лазере с оптическим селектором позволяет формировать узкополосное излучение с короткой длительностью импульса (0.15 нс) и расходимостью, близкой к дифракционному пределу.

В пятой главе приведено описание результатов экспериментальных и численных исследований широкоапертурных КгF- и ХеСl-лазерных систем, позволяющих получать качественное излучение с высокой энергией в импульсе. Показано, что лазерный пучок может быть сформирован в широком диапазоне длительностей импульсов от 0,1 до 220 нс, с энергией до 330 Дж, шириной спектральной линии $\geq 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ и расходимостью $\sim 10^{-5}$ рад. Отмечается, что усиление пучка с изменяющейся пространственной конфигурацией поля вдоль оптической оси в однородной активной среде, обеспечивающей режим насыщения усиления, приводит к искажению однородного распределения коэффициента усиления и, соответственно, к уширению диаграммы направленности формирующегося излучения. Выявлены условия получения в широкоапертурных электроразрядных КгF- и ХеСl-усилителях импульсов излучения с высокой энергией и узкой шириной линии.

Шестая глава посвящена описанию результатов исследований ОВФ при ВРМБ слабоискаженного пучка ХеСl-лазера. Показано, что максимальный коэффициент качества ОВФ $H = 90$ при использовании в качестве нелинейной среды гептана достигается при величине относительного отверстия фокусирующей оптической системы $D/F \leq 1/80$. Отмечается, что длительность рассеянного излучения от гептана ограничивается величиной 15 нс при изменении интенсивности пучка накачки в диапазоне $10^7 - 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ и ширины спектральной линии от 0,02 до 24 см^{-1} .

В седьмой главе представлены результаты исследований создания в электроразрядной плазме активной среды на молекулах Kr_2F^* . Предложенный в работе подход для зажигания диффузного разряда в эксимерных плотных газах позволил реализовать условия существования активной среды на трехатомных молекулах Kr_2F^* . Показано, что на спектральном контуре флуоресценции имеется два основных максимума интенсивности на длинах волн 414 и 456 нм, которые соответствуют электронным переходам $4^2\text{Г} - (1,2)^2\text{Г}$ молекул Kr_2F^* .

В **Заключении** приводятся основные результаты и общие выводы работы.

Оценивая в целом диссертационную работу Панченко Ю. Н., считаю необходимым отметить следующее:

Научная ценность:

1. Установлено, что в квазиоднородной плазме с концентрацией электронов в диапазоне $(6-8) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, зажигаемой в эксимерных плотных газах, реализуется эффективная генерация лазерного излучения.

2. Определены условия, обеспечивающие устойчивость горения множественных пространственно распределенных диффузных каналов, обладающих свойствами активной среды при повышенных удельных мощностях накачки.

3. Установлено, что в широкоапертурном длинноимпульсном (более 200 нс) ХеСl-усилителе возможно создание активной среды, позволяющей формировать излучение с расходимостью (2×10^{-5} рад) близкой к дифракционному пределу.

4. Показана возможность использования особенности контура усиления активной среды ХеСl-задающего генератора для дополнительной спектральной селекции формирующегося излучения.

5. Получены условия применимости использования ОВФ при ВРМБ для компенсации фазовых искажений волнового фронта с расходимостью менее 10^{-5} рад в оптическом тракте ХеСl-лазерной системы.

6. Определены условия горения газоразрядной плазмы, обладающей свойствами активной среды на молекулах Kr_2F^* .

Новизна результатов диссертации заключается в следующем:

1. Определены способы и необходимые условия увеличения удельной энергии излучения и КПД электроразрядных XeCl - и KrF -лазеров до значений, близких к теоретически допустимым, за счет роста удельной мощности накачки и сохранения высокой устойчивости горения объемного разряда.

2. Предложен способ зажигания устойчивого пространственно неоднородного разряда в эксимерных лазерах при высоких удельных мощностях накачки.

3. Сформулировано эмпирическое соотношение, связывающее величину удельной мощности накачки с длительностью импульса накачки.

4. Для достижения высокой когерентности излучения и расширения области перестройки его характеристик предложено создать XeCl - и KrF -модули в виде задающего генератора и двухпроходного усилителя.

5. Обнаружен механизм дополнительной спектральной селекции излучения в XeCl -задающем генераторе. Предложен способ формирования в XeCl -лазере излучения с дифракционной расходимостью в нано- и субнаносекундном диапазоне длительности.

6. Определены необходимые условия и оценены границы применимости использования метода ОВФ при ВРМБ в оптическом тракте широкоапертурной XeCl -лазерной системы.

7. Установлены условия образования активной среды на молекулах Kr_2F^* в газоразрядной плазме.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в следующем:

1. Созданы эффективные с КПД $\sim 4\%$ электроразрядные XeCl - и KrF -лазеры серии EL со средней мощностью излучения до 100 Вт и рекордной удельной энергией импульсов излучения 5 и 9,5 Дж/л соответственно.

2. Получена максимальная удельная энергия импульса излучения более 10 Дж/л в электроразрядном XeCl лазере с КПД $\approx 2\%$ в условиях пространственно неоднородного разряда, состоящего из множества диффузных макроканалов.

3. Определены необходимые условия накачки и состав газовой смеси электроразрядного длинноимпульсного (более 200 нс) XeCl -усилителя для формирования однородной активной среды, позволяющей усилить пучок диаметром до 40 мм с расходимостью близкой к дифракционному пределу ($2 \cdot 10^{-5}$ рад).

4. Предложена оптическая схема, обеспечивающая в электроразрядных XeCl - и KrF -лазерах формирование излучения с рекордными по совокупности характеристиками излучения.

5. Разработанный KrF -лазер использован в лидарной системе по обнаружению в атмосфере сверхнизких концентраций паров и следов опасных и вредных веществ. XeCl -лазер использован в широкоапертурной (~ 40 см) пятикаскадной XeCl -лазерной системе с длительностью импульса 230 нс и энергией пучка 330 Дж.

5. Разработана оптическая схема XeCl -задающего генератора с оптическим селектором на основе процесса ВРМБ, позволяющая формировать высококонтрастные качественные пучки с энергией генерации 0,2 и 1 мДж при длительностях импульсов 0,15 и 3,4 нс соответственно.

6. Реализована компенсация фазовых искажений волнового фронта пучка в оптическом тракте XeCl -лазерной системы для импульса излучения с длительностью от 20 до 80 нс и расходимостью до $7,5 \cdot 10^{-6}$ рад за счет использования ОВФ при ВРМБ.

7. Впервые в разрядной плазме создана активная среда на молекулах Kr_2F^* с коэффициентом усиления не менее $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и шириной спектральной полосы флуоресценции ~ 100 нм на полувысоте интенсивности.

Достоверность выносимых на защиту положений и других результатов работы обусловлена применением общепринятых методик, использованием стандартных измерительных приборов для измерения электрических параметров электроразрядных лазеров, энергетических, временных, спектральных характеристик лазерного и рассеянного излучения.

В основе утверждения о достоверности лежат высокая повторяемость результатов и обнаруженных эффектов с точностью более 85 % на различных экспериментальных установках, а также сопоставимостью полученных закономерностей в настоящей работе и работах других авторов.

В целом диссертация Панченко Ю. Н. содержит **достоверные** данные, которые подтверждаются систематическим характером исследований, реализацией научных положений и выводов при создании конкретных установок, что подтверждается публикациями соискателя. **Обоснованность** выводов закономерно вытекает из результатов экспериментальных и расчетных исследований модели ХеС1- и КгF-лазеров. Автореферат диссертации полно отражает ее содержание.

Апробация материалов диссертации и публикации. Результаты диссертационной работы Панченко Ю. Н. опубликованы в 54 печатных работах, включая 27 публикаций в журналах из списка рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований и входящих в базы данных Web of Science, Scopus, 1 монография, получено 8 патентов, результаты работы широко докладывались на различных Международных конференциях.

Личный вклад соискателя состоял в постановке задач исследований, планировании экспериментов, разработке лазеров и лазерных систем, обработке и анализе полученных экспериментальных данных. Результаты, представленные в диссертации, получены либо лично автором, либо совместно с коллегами при непосредственном участии автора, в ходе многолетних исследований и разработке эксимерных электроразрядных лазеров и мощных лазерных систем с высоким качеством.

Замечания по работе.

1. В работе использовано множество сокращений: ВРМБ, ОВФ (стр.9, 45), ДР, ЭФ П. 31' (стр. 37), ПС, УСИ (стр. 38,141), ВКР, УФС (стр. 40, 41), FWHM стр. 17) и т.д. При таком обилии сокращений в диссертации нет страницы с расшифровкой сокращений, что затрудняет чтение.

2. Непонятна информация, представленная на стр. 225 в столбце «Константа скорости см³, см⁶». Чему равны эти константы? В чем их разница?

3. Есть погрешности в оформлении списка литературы: см. 132-135, 110, 112.

4. В лазерах в качестве окон использовались кристалла СаF2 , MgF2 , стекла КУ. Кристаллы СаF2 , MgFT окрашиваются под действием электронов с энергиями выше 12 эВ, которые есть в разряде. Это могло приводить к изменению пропускания окон. Как учитывалось, проверялось возможное окрашивание окон?

5. Непонятно, почему форма импульса излучения на рис. 4.12 двугорбая. Изменяется ли форма импульса с изменением условий возбуждения?

6. При описании характеристик излучения задающего генератора или лазерной системы часто используется такой параметр как «расходимость, превышающая дифракционную в несколько раз». Однако при этом не отмечается пространственное распределение интенсивности по сечению пучка, которое имеет существенное значение для величины угла первого лепестка диаграммы направленности излучения и долю энергии в нем. Т.к. $\phi = k \times A/d_0$, где k – коэффициент, зависящий от распределения интенсивности и может меняться в широких пределах.

Заключение. Отмеченные выше замечания по диссертации не влияют на общую высокую оценку работы. Считаю, что в диссертации Панченко Юрия Николаевича «Энергетические, временные, пространственные и спектральные характеристики излучения в перестраиваемых ХеС1- и КгF-лазерных источниках» представлено решение актуальной научной проблемы, которая содержит оригинальные результаты и имеет существенное значение

для решения практических задач по созданию электроразрядных ХеСl- и КгF-лазеров с высоким КПД, большой удельной энергией импульса генерации и хорошим качеством излучения в мощных широкоапертурных лазерных системах на их основе. Диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Автор диссертации Панченко Юрий Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент,
Лисицын Виктор Михайлович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела, профессор по кафедре светотехника и источников света, профессор-консультант отделения материаловедения ИШНПТ ТПУ, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

12.03.2019



В. М. Лисицын

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Тел.: +7 (3822) 41-98-31

e-mail: lisitsyn@tpu.ru;

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Тел.: +7 (3822) 60-63-33

tpu@tpu.ru

<http://www.tpu.ru>

Подпись профессора В. М. Лисицына заверяю
Ученый секретарь университета



Ананьева О. А.