

ОТЗЫВ

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

Актуальность исследования. Диссертация Панченко Ю. Н. посвящена изучению физических процессов и выяснению механизмов формирования в широкоапертурных ХеСl- и КгF-лазерных системах качественного излучения с высокой энергией в импульсе и возможностью управления его временными, пространственными и спектральными характеристиками, а также созданию на этой основе лазеров с высокой удельной энергетикой. Такие устройства находят применение для разделения изотопов, получения нанопорошков и тонких пленок, в фотолитографии, медицине, зондировании атмосферы, научных исследованиях и т.д. Поэтому актуальность данной диссертации не вызывает сомнения.

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

Первая глава имеет обзорный характер, где приводятся имеющиеся в литературе наиболее значимые результаты по тем научным исследованиям, которые рассматриваются в диссертации. Отмечается, что для эффективного управления характеристиками излучения и повышения удельной энергетикой электроразрядных эксимерных лазеров и лазерных систем необходимо не только улучшать оптические методы формирования излучения, но и улучшать условия устойчивости и однородности горения диффузного разряда.

Во второй главе приводится описание используемой экспериментальной аппаратуры, лабораторных лазерных макетов, методов проведения эксперимента, а также применяемых численные модели ХеСl- и КгF-лазеров.

Третья глава посвящена описанию и анализу результатов экспериментов и численных расчетов работы электроразрядных ХеСl- и КгF-лазеров с энергией излучения до 1 Дж. Одной из основных задач, решаемых в исследованиях, было определение условий устойчивого горения объемного разряда при высоких удельных мощностях накачки (более 3 МВт/см³) в таких лазерах. На основе полученных результатов выявлено развитие различных типов неоднородностей в объемном разряде в зависимости от величины удельной мощности накачки и состава газовой смеси. Впервые показано, что с ростом мощности накачки возможно сохранение объемной формы разряда, состоящего из

множества диффузных макроканалов, обеспечивающих существование активной среды в течение всей длительности импульса накачки.

В четвертой главе диссертации рассматриваются результаты исследований различных методов формирования высококогерентного излучения в лазерных генераторах на молекулах XeCl и KrF . При этом основные усилия диссертанта были направлены на получение излучения с узкой спектральной полосой, малой расходимостью и плавной перестройкой длины волны излучения. В ходе этих исследований экспериментально апробировано несколько методов различного уровня сложности. Показано, что ширина генерируемой линии может составлять $0,018\text{Å}$, расходимость излучения $1,12$ дифракционного угла, перестройка длины волны излучения от 2475 до 2495Å . Найдено, при фокусировке излучения на поверхность гептана оптический пробой обрывает излучение. Это позволило получать импульсы излучения длительностью $0,15\text{нс}$ с расходимостью близкой к дифракционной. В данной главе также рассмотрены оригинальные оптические резонаторы эксимерных лазеров, включающие в свой состав линейные и нелинейные оптические элементы.

Пятая глава посвящена исследованию повышения энергии качественного излучения в электроразрядных и пучковых широкоапертурных XeCl - и KrF -лазерных системах, работающих в разных режимах усиления. Показано, что усиление излучения с пространственно изменяющейся конфигурацией будет приводить к искажению волнового фронта за счет усиления слабых волн. Установлено, что к подобному результату могут приводить амплитудные неоднородности активной среды, которые отсутствуют при горении объемного разряда с высокой однородностью. Найдено, что режим прямого усиления более пригоден для управления спектральными параметрами излучения по сравнению с инжекционным методом. Сообщается об условиях получения в пятикаскадной системе импульсов излучения с энергией до 330Дж с высоким качеством излучения. Проведен сравнительный анализ экспериментальных результатов с полученными результатами численных моделей.

В шестой главе описываются экспериментальные результаты исследования ВРМБ, а также приводятся квантово-химические расчеты энергий состояния вещества при взаимодействии излучения XeCl -лазера с гептаном. Показано, что нарушение фазового синхронизма при ВРМБ возникает в результате развития сопутствующих эффектов ВТР и фотодиссоциации, обусловленных наличием двухфотонного поглощения в жидкости (гептан или гексан). Продемонстрировано, что обеспечение оптимальных параметров лазерного излучения и условий его взаимодействия с нелинейной средой (газообразный SF_6) позволило впервые реализовать ОВФ при ВРМБ для пучка XeCl -лазера, имеющего

расходимость излучения до 5×10^{-6} рад. Отмечено, что в случае использования широкополосной лазерной накачки ВРМБ-среда может выступать как пространственный и спектральный селектор, позволяющий дополнительно управлять характеристиками излучения. Продемонстрировано сжатие пучка накачки ХеСІ-лазера с 20 до 1 нс с сохранением пространственно-угловой направленности рассеянного излучения.

В седьмой главе приводятся результаты исследований возможности создания активной среды на трехатомных молекулах Kr_2F^* в электроразрядной плазме. Найдены условия устойчивого горения объемного разряда в эксимерной смеси с длительностью ~ 500 нс. Впервые в такой плазме измерено усиление на молекулах Kr_2F^* , излучающих в широкой спектральной области. Данный факт позволяет надеяться на возможность создания электроразрядного усилителя фемтосекундных импульсов в видимом диапазоне спектра.

В Заключении сформулированы основные научные и практические результаты и выводы, полученные в диссертационной работе.

Изложенный материал в автореферате полностью отражает содержание диссертационной работы.

Анализируя содержание диссертации, можно заключить в целом следующее. В результате выполненных исследований разработана методология и техника для создания в нашей стране многокаскадных широкоапертурных мощных лазерных систем на галогенидах инертных газов, позволяющие генерировать импульсы с высоким качеством излучения.

В ходе этой значимой работы выполнен большой объем исследований и получен ряд важных и интересных результатов, среди которых выделю следующие.

- Найдены условия возбуждения длительных(более 300нс) объемных разрядов в галогенидах инертных газов с большим уровнем поглощаемой энергии, позволяющих усиливать излучение с дифракционной расходимостью.

-Впервые показано, что энергонасыщенная плазма со значительным объемом, заполненным диффузными каналами, является активной средой с большим коэффициентом усиления и высокой эффективностью генерации излучения.

-Создан и исследован ряд лазеров с апертурой до 40см и различным уровнем выходного излучения, энергетические параметры которых имеют либо рекордные значения, либо близкие к ним. Например в ХеСІ лазере удельная энергия излучения составила 15Дж/л при эффективности 2% и мощности накачки 10 МВт/см^3 . В KrF лазере она достигла рекордной для таких устройств величины 9,5Дж/л при эффективности 3,8%.

-Впервые электроразрядным методом возбуждения создана активная Kr_2F среда с широкой полосой усиления, что важно для разработки генераторов и усилителей ультракоротких импульсов излучения.

-Интересными и важными являются исследования диссертанта, направленные на реализацию малой расходимости и длительности излучения, узкой ширины генерируемой спектральной линии и плавной перестройки частоты излучения. В ходе этих исследований установлены основные причины искажения волнового фронта излучения и найдены методы их устранения. Получена расходимость $5 \cdot 10^{-6}$ рад и реализована плавная перестройка длины волны в диапазоне 2475-2495А при ширине генерируемой линии 0,018А. Впервые показано, что при компрессии импульса излучения с 20 до 1нс возможно повышение интенсивности в 10 раз.

-Следует также отметить создание пятикаскадной $HeCl$ системы с энергией генерации до 330Дж, которая имеет наибольшую длительность импульса и не ухудшает расходимость в процессе усиления излучения.

Новизна положений и заявленных в работе результатов не вызывает сомнений, так как основу большинства полученных результатов составляют предложенные автором оригинальные способы, условия, а также, разработанные устройства, защищенные патентами (по данной теме 8 патентов).

К наиболее существенным результатам диссертации, составляющим практическую значимость, можно отнести следующие:

- созданы эффективные электроразрядные $HeCl$ - и KrF -лазеры, обеспечивающие удельную энергию излучения ~ 10 Дж/л;

- создана широкоапертурная (~ 40 см) пятикаскадная $HeCl$ -лазерная система, включающая в себя три электроразрядных усилителя, в которой получено качественное излучение с рекордно большой длительностью импульса 220 нс и энергией пучка 330 Дж;

- разработаны различные типы оптических селективных резонаторов для малоапертурных задающих генераторов на молекулах $HeCl$ и KrF , определены условия взаимодействия формирующегося излучения с активной средой, позволяющие достичь рекордно большие по совокупности характеристики излучения;

- разработаны $HeCl$ - и KrF -лазерные системы, основанные на различных методах управления характеристиками излучения;

- показана возможность использования ОВФ при ВРМБ для компенсации искажений волнового фронта пучка $HeCl$ -лазера, имеющего расходимость излучения $5 \cdot 10^{-6}$ рад;

- разработаны КгF-лазерные системы с уникальными характеристиками излучения, которые впервые были использованы в лидарной системе по обнаружению паров и следов взрывчатых веществ в атмосфере и на поверхности различных объектов инфраструктуры.

Достоверность защищаемых научных положений, выносимых на защиту, обусловлена применением общепринятых методик измерения спектрально-энергетических и пространственных характеристик оптического излучения с погрешностью не более 10%. Контроль постоянства условий эксперимента и повторяемость результатов во многих сериях экспериментов также доказывает их достоверность.

Результаты работы известны специалистам по публикациям (опубликовано 54 работы, из них 27 статей в журналах, входящих в перечень ВАК и базы данных Web of Science и Scopus), докладам на международных конференциях и семинарах. Автореферат и диссертационная работа хорошо отражает личный вклад автора в исследуемую проблему, который выражается участием в постановке задачи и выборе экспериментального материала, анализе и обработке полученных результатов. Они написаны понятным языком и дают ясное представление о целях и задачах работы, используемых методах и средствах исследования, полученных результатах и сделанных выводах.

Диссертационная работа выполнялась в рамках фундаментальных научных исследований в соответствии с планами госбюджетных заданий, проводившихся в лаборатории газовых лазеров ИСЭ СО РАН в период 2002–2017 гг., а также при проведении работ, поддержанных различными грантами РФФИ, РФФ, ФНИ СО РАН и договорами с российскими и зарубежными компаниями.

Большая часть полученных результатов Ю. И. Панченко отличаются новизной и носят приоритетный характер. Они представляют несомненный интерес и вносят значительный вклад в изучение упомянутых выше вопросов.

Диссертационная работа и автореферат содержат ряд недостатков.

1. При исследовании влияния предварительной ионизации на характеристики разряда измерения начальной концентрации электронов не проводились. Поэтому трудно установить было ли перекрытие лавинных цепей и достигалась ли на начальной стадии однородность разряда. Дело в том, что при всей видимости однородности разряда он может состоять из диффузных нитей, как это регистрировалось ранее (Appl. Phys. 31 27, 1983). Последнее особенно важно при анализе структурированных разрядов.
2. Отсутствует удовлетворительное объяснение резкого снижения интенсивности лазерного излучения в центральной области межэлектродного промежутка при

плотности мощности накачки в ней $4,6 \text{ МВт/см}^3$ (стр.93, рис.3.16 и рис 3.20), где согласно расчетам эффективность должна составлять более 3%. Казалось бы можно предполагать, что данный факт связан с выгоранием галогена, но это не вяжется с получением высокоэффективной генерации в разряде с диффузионными каналами, где мощность была еще выше.

3. Высокую однородность разряда на стадии роста тока диссертант связывает с тем, что "при формировании локальной токовой неустойчивости с повышенной концентрацией электронов будет происходить снижение напряженности поля, что приведет к уменьшению роста концентрации в ней" (стр.83). С электротехнической это вряд ли возможно, но даже если это так, то эта идея справедлива только при отсутствии влияния тепловой неустойчивости, которая может привести к повышению температуры в токовой нити, уходу нейтралов, росту E/N (E -напряженность поля, N -концентрация нейтралов) и дальнейшему повышению тока. Следовало бы оценить наличие последней путем расчета времени диффузии нейтралов из токовой нити.
4. Судя по фотографиям свечение разряда наиболее интенсивно в центральной зоне межэлектродного промежутка (стр.83). Поэтому непонятно, почему используются круглые электроды без их профилирования в зоне разряда.
5. Отсутствует объяснение достижения высокой удельной мощности и эффективности в разрядах, содержащих диффузные каналы (стр.85)
6. Имеются недостатки в изложении результатов.

-Иногда используется жаргонные выражения: "усилитель, работающий в режиме насыщения"(стр.11), при этом автор имел в виду: "в режиме, в котором необходимо учитывать насыщение", так как в режиме насыщения усиление отсутствует; HCl называется галогеном.

-Встречаются неудачные выражения: "из-за высокого уровня потерь электронов в таунсендовской плазме"(стр.92), в такой плазме нет потерь электронов, а только их лавинное размножение; "мощность, вкладываемая в разряд"(стр.89), в разряд вводится энергия.

-Используются термины без должного их разъяснения, что конкретно они означают: "энергии излучения, близкие к теоретически допустимым", "качественное излучение" (стр.11), внутренний КПД (стр.85).

-Имеются орфографические и стилистические неточности:

Пропущен глагол "является"(стр.11), выражение- "в которых"(стр.25); в ряде предложений отсутствуют запяты.

Однако эти недостатки не касаются существа диссертации.

В целом диссертация Панченко Юрия Николаевича представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Считаю, что работа удовлетворяет требованиям ВАК (п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней»), предъявляемым к докторским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент,

Осипов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.04 – «Физическая электроника, в том числе квантовая», член-корреспондент РАН, Заведующий лабораторией квантовой электроники, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

В. В. Осипов

В. В. Осипов

620016, Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

Тел.: +7 (343) 267-87-73

Тел.: +7 (343) 267-87-96

E-mail: osipov@iep.uran.ru, admin@iep.uran.ru

<http://www.iep.uran.ru>

Подпись член-корреспондента РАН В. В. Осипова заверяю

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН к.ф.-м.н.

28 февраля 2019 г.



Е. Е. Кокорина