

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

РГБ ОД  
- 7 ФЕВ 2000

Лосев Валерий Федорович

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОКОКОГЕРЕНТНОГО ЛАЗЕРНОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ В УФ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

01.04.05 - оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Томск - 2000

Работа выполнена в Институте сильноточной электроники СО РАН и Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники

**Официальные оппоненты:**

Доктор физико-математических наук, профессор О.Б.Данилов

Доктор физико-математических наук, профессор И.В.Самохвалов

Доктор физико-математических наук, профессор Т.Н.Копылова

**Ведущая организация:** Институт лазерной физики СО РАН

Защита состоится 24 февраля 2000 г.

В 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 063.53.02 в Томском государственном университете по адресу: 634050, Томск, пр. Ленина, 36, ауд.119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ТГУ.

Автореферат разослан "      " января 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета



Пойзнер Б.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы

С открытием в 1975 году (Searl S.K. and Hart G.A. //Appl. Phys. Lett.– 1975, V.27, P. 243-246; Ewing J.J., Brau C.A. //Appl. Phys. Lett.– 1975, V.27, P.350-352) лазеров на галогенидах благородных газов (названных эксимерными лазерами) появился новый класс высокоэффективных источников когерентного излучения, спектральный диапазон которых перекрыл широкую область ближнего ультрафиолета. В течение первых лет основное внимание исследователей было обращено на изучение способов возбуждения лазеров, поиск оптимальных газовых смесей, получение новых линий генерации (различные молекулы) и повышение эффективности лазеров. Для возбуждения эксимерных лазеров наиболее подходящим оказался объемный электрический разряд и пучок ускоренных электронов. Типичный уровень энергии генерации в первых лазерах составлял десятки – сотни миллиджоулей, длительность импульса излучения – десятки и сотни наносекунд. Наиболее перспективными оказались лазеры на молекулах XeCl (длина волны  $\lambda = 308$  нм) и KrF ( $\lambda = 248$  нм), эффективность генерации которых достигала ~ 5 и 10%, соответственно. Несмотря на меньшую эффективность XeCl лазера, он выгодно отличался от KrF лазера менее агрессивной и более долгоживущей газовой смесью; более доступными и дешевыми оптическими элементами; лучшей однородностью горения разряда накачки и, следовательно, возможностью получения большей энергии и длительности импульса генерации, более высокой степени когерентности излучения.

В результате исследований выяснилось, что излучение эксимерных лазеров имеет очень низкую степень временной и пространственной когерентности. Это было обусловлено, прежде всего, рядом особенностей самих лазеров. Слабосвязанный либо разлетный нижний терм эксимерных молекул приводит к большой ширине спектральной линии излучения в режиме свободной генерации ( $\Delta\nu \sim 20-30$  см<sup>-1</sup>). Малая длительность импульса генерации и большая длина активной области (50 – 100 см) затрудняют формирование низших мод в резонаторе. В связи с этим расходимость излучения эксимерных лазеров обычно составляет ~ 1-10 мрад.

В тоже время для многих прикладных задач требовались лазерные пучки с различной энергией и длительностью импульса излучения, которые бы имели малую расходимость и узкую ширину спектральной линии. В связи с этим к началу 80-х годов остро встал вопрос как о повышении мощности и энергии эксимерных лазеров, так и о повышении степени когерентности их излучения.

Благодаря короткой длине волны излучения, высокой эффективности и возможности достижения большой мощности, эксимерные лазеры стали рассматриваться как наиболее перспективные источники для экспериментов по инерционному термоядерному синтезу и для проведения фундаментальных исследований по взаимодействию сверхмощного излучения с веществом. В связи с этим появилась потребность исследования, разработки и создания широкоапертурных эксимерных лазеров (усилителей) с активным объемом в десятки-сотни литров и использования их для формирования УФ излучения с высокой яркостью.

В конце 70-х годов, к моменту начала выполнения настоящей работы, в литературе существовали только краткие информативные сообщения относительно параметров первых эксимерных лазеров, и практически отсутствовала информация относительно повышения когерентности их излучения. Развитие эксимерных лазеров во всем мире с точки зрения повышения энергии и качества их излучения осуществлялось параллельно с выполнением настоящей работы. При этом основное внимание исследователей было обращено на KrF лазер, с которым и были получены в дальнейшем наиболее серьезные научные и практические результаты. В конечном итоге были созданы такие уникальные KrF лазерные системы, как "Sprite" и "Titania" (Англия), "Nike" (США) и "Ashura" (Япония) с уровнем энергии излучения в импульсе 100-1000 Дж, на которых в настоящее время изучаются возможности формирования излучения с высокой яркостью и его взаимодействие с веществом.

### **Цель работы**

Целью настоящей работы являлось исследование процессов формирования мощных импульсов излучения с высокой степенью когерентности в XeCl лазерах и лазерных системах для создания ультрафиолетовых источников излучения большой яркости.

### **Задачи исследований**

В рамках поставленной цели решались следующие задачи.

1. Создание мощных XeCl лазеров с энергией излучения в импульсе 10 - 100 Дж и оптимизация условий их возбуждения и генерации.
2. Изучение процессов формирования мод неустойчивого резонатора в XeCl лазерах с целью получения максимальной яркости излучения.
3. Исследование возможности управления пространственно-угловыми и спектральными характеристиками излучения XeCl лазеров в режиме инжекционной синхронизации.

4. Создание задающего генератора на молекуле XeCl и исследование условий формирования в нем излучения с дифракционной расходимостью и минимальной шириной спектральной линии.
5. Исследование процессов формирования лазерного пучка в XeCl усилительной системе с большой выходной апертурой (до 25x25 см) с целью получения в ней импульсов излучения с высокой энергией и минимальной расходимостью.
6. Использование ВРМБ и ВКР для управления параметрами излучения XeCl лазеров.

Основным методом исследования в работе является физический эксперимент, который включал в себя измерение энергетических, спектральных, временных, поляризационных и пространственных параметров лазерного излучения; используется также математическое моделирование на ЭВМ и оценочные расчеты.

### **Защищаемые положения**

1. Величина минимальной расходимости излучения в широкоапертурных ( $a \geq 10$  см) эксимерных лазерах с неустойчивым конфокальным резонатором положительной ветви ограничивается потоками усиленного спонтанного излучения. Уменьшить влияние этих потоков и приблизиться к дифракционной расходимости излучения позволяет резонатор со сферически-выпуклыми зеркалами, в котором величина минимальной расходимости определяется оптической неоднородностью активной среды.

2. Эффективное управление ( $\eta \geq 90\%$ ) спектральными, пространственными и поляризационными параметрами излучения электроразрядного XeCl лазера в режиме инжекционной синхронизации возможно лишь при малой длительности импульса его генерации ( $\leq 30$  нс) и полном заполнении его активной среды от моментов начала накачки до начала генерации внешним сигналом с интенсивностью более  $0,1 \text{ Вт/см}^2$ . В широкоапертурном XeCl лазере с длительностью импульса 250 нс в режиме ИС показана возможность эффективного управления спектральным составом излучения.

3. При усилении излучения с дифракционной расходимостью в широкоапертурной XeCl лазерной системе наибольшее влияние на его волновой фронт оказывают турбулентные потоки как в лазерной смеси, так и на участках его транспортировки в воздухе. Активная среда усилителя, возбуждаемого электронным пучком, позволила без видимых искажений волнового фронта усиливать пучок диаметров до 10 см.

4. ХеСl лазер, возбуждаемый электронным пучком, позволяет реализовать высокий КПД и энергию излучения в импульсе  $\sim 100$  Дж и более при накачке с удельной мощностью  $\sim 200 - 400$  кВт/см<sup>3</sup>, с длительностью импульса на полувысоте от максимальной мощности  $\sim 300$  нс и степенью неоднородности не более 30%.

5. При взаимодействии со средой ВРМБ излучения ХеСl лазера с низкой степенью когерентности и с интенсивностью  $\sim 100$  МВт/см<sup>2</sup> стоков сигнал имеет высокую степень когерентности. Использование этого явления в ХеСl лазере с резонатором, образованным полупрозрачным выходным зеркалом и ВРМБ средой, позволило сформировать в нем узкополосное излучение ( $\Delta\nu = 0.3$  см<sup>-1</sup>) с высокой направленностью (30% энергии в  $\theta_d$ ).

6. При ВКР пучка ХеСl лазера в парах свинца и сжатом водороде экспериментально достигнуты близкие к физическому пределу параметры излучения: квантовая эффективность преобразования в одну стоковую компоненту 92% и 95%, соответственно; расходимость преобразованного излучения, близкая к дифракционному пределу  $\theta_d$  в водороде и нескольких  $\theta_d$  в свинце; ширина спектральной линии  $\Delta\nu = 0.01$  см<sup>-1</sup> в водороде и  $\Delta\nu = 0.05$  см<sup>-1</sup> в свинце: получено рекордное количество (около 70) одновременно наблюдаемых вращательно-колебательных линий в водороде.

### **Достоверность результатов работы**

Достоверность результатов, отраженных в научных положениях и выводах, обусловлена применением различных общепринятых методик для измерения одних и тех же параметров, совпадением экспериментальных результатов с расчетными, и согласием результатов работы с данными, полученными другими авторами (J. McKee, H.E. Cartland, F. Kannari, M.R. Perrone и т. д.).

### **Научная новизна работы**

- впервые показано, что в широкоапертурных эксимерных лазерах с неустойчивым конфокальным резонатором положительной ветви величина минимальной расходимости излучения определяется потоками усиленного спонтанного излучения, а в резонаторе со сферически-выпуклыми зеркалами оптической неоднородностью активной среды;

- впервые показано, что эффективность управления параметрами излучения ХеСl лазера в режиме инжекционной синхронизации уменьшается при увеличении его

длительности импульса более 30 нс. При длительности  $\tau_{1/2} \sim 250$  нс лучшая управляемость реализована для спектрального состава излучения.

- впервые показано, что высокая эффективность генерации в широкоапертурном ХеСl лазере, возбуждаемом электронным пучком с длительностью импульса  $\tau_{1/2} \sim 300$  нс, реализуется при удельной мощности накачки  $\sim 200 - 400$  кВт/см<sup>2</sup>;

- обнаружена пространственная и спектральная селекция излучения ХеСl лазера при взаимодействии его излучения интенсивностью  $\sim 100$  МВт/см<sup>2</sup> с ВРМБ средней (Патент № 2077756 от 20.04.97 г.);

- впервые показано, что активная среда ХеСl усилителя, возбуждаемого электронным пучком, позволяет без видимых искажений волнового фронта усиливать излучение с расходимостью  $\sim 0.01$  мрад;

- впервые экспериментально показано, что преобразованное при ВКР излучение ХеСl лазера в водороде может иметь расходимость близкую к дифракционному пределу а ширину спектральной линии  $\Delta\nu = 0,01$  см<sup>-1</sup>.

#### **Научная ценность работы**

1. Активная среда ХеСl усилителя, возбуждаемого электронным пучком, позволила без искажений волнового фронта усиливать излучение с расходимостью 0.01 мрад.
2. Использование режима нижекнонной синхронизации в ХеСl лазере с энергией генерации  $\sim 100$  Дж позволило получить на узкой спектральной линии 90% энергии излучения.
3. Взаимодействие усиленного спонтанного излучения ХеСl лазера интенсивность 100 МВт/см<sup>2</sup> со средней ВРМБ позволило сформировать узкополосное ( $\Delta\nu = 0,3$  см<sup>-1</sup>) излучение с малой расходимостью.
4. Высококогерентное излучение ХеСl лазера позволило достигнуть квантовой эффективности ВКР (водород, пары свинца) на одной стоксовой компоненте более 90%.

#### **Практическая значимость работы**

1. Создана четырехкаскадная ХеСl усилительная система с выходной апертурой 25x25 см и энергией излучения 200 Дж, позволяющая формировать мощные импульсы различной длительности с высокой степенью временной и пространственной

когерентности. Получен лазерный пучок с расходимостью 0.01 мрад, что позволило более чем на два порядка повысить плотность энергии на мишени.

2. Показано, что использование одночастотной накачки пучка ХеСІ лазера при ВКР в сжатом водороде позволяет получить одновременно до 70 спектральных линий излучения, что примерно в два раза превышает число линий, наблюдаемых при двухчастотной накачке.

3. Показано, что использование в качестве одного из зеркал резонатора ВРМБ среды в ХеСІ лазере позволяет более чем на два порядка уменьшить ширину его спектральной линии и на один порядок расходимость излучения.

### **Внедрение результатов работы**

Результаты исследований по формированию минимальной расходимости излучения в эксимерных лазерах с неустойчивым резонатором использованы в Институте электрофизики УрО РАН (г. Екатеринбург) при создании установки для обработки твердотельных материалов.

Ряд созданных экспериментальных установок и их документация были внедрены в Физическом институте АН СССР (г. Москва) для научных исследований, в Институте прикладной физики АН СССР (г. Горький) для исследований ОВФ, в Институте оптики атмосферы СО АН СССР (г. Томск) для получения мощных коротких импульсов.

Полученные в работе оптимальные условия возбуждения ХеСІ лазера электронным пучком легли в основу разработки и создания в ИСЭ СО РАН компактных и эффективных широкоапертурных эксимерных лазеров с уровнем энергии излучения в импульсе 100 – 1000 Дж.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в различных организациях и НИИ (ФИ РАН, ИЭФ УрО РАН, ИПФ РАН, НИИ ЭФА, ИОЛ СО РАН, ГОИ):

- при разработке и создании широкоапертурных электроразрядных ХеСІ лазеров с энергией излучения в десятки джоулей;
- при разработке и создании ХеСІ лазеров, возбуждаемых электронным пучком, с уровнем энергии генерации в импульсе 100 Дж и более;
- при разработке и создании задающего генератора на молекуле ХеСІ;
- для формирования в мощных эксимерных лазерах и лазерных системах импульсов высококогерентного излучения;
- для управления параметрами излучения ХеСІ лазеров путем использования ВРМБ;



- для расширения спектрального диапазона высококогерентного излучения при ВКР пучка ХеСl лазера;

### **Вклад автора**

При получении результатов настоящей работы автором внесен определяющий вклад, выраженный в постановке задачи, разработке и проектировании экспериментальной техники, выполнении расчетов и моделирования, проведении экспериментов и интерпретации их результатов.

### **Апробация работы**

Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на Международных конференциях Лазеры'79 (Флорида) и Лазеры'80 (Новый Орлеан); Международной конференции по явлениям в ионизованных газах (Минск, 1981); Международной конференции и школы "Лазеры и применение" (Бухарест, 1982); IV и VII Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике (Томск, 1982, 1988); II Всесоюзном совещании по физике электрического пробоя газов (Тарту, 1984); Всесоюзном семинаре "Физика быстропротекающих процессов" (Гродно, 1986); Всесоюзном совещании "Инверсная заселенность и генерация на переходах в атомах и молекулах" (Томск, 1986); III Всесоюзной конференции по физике газового разряда (Киев, 1986); Всесоюзном семинаре "Спектроскопия активных сред газоразрядных лазеров" (Лохусалу, 1988, 1990); III Всесоюзной конференции "Взаимодействие излучения плазменных и электронных потоков с веществом" (Сухуми, 1988); XIII Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике, симпозиуме "Плазменные лазеры" (Минск, 1988); VI, VII, VIII Всесоюзных конференциях "Оптика лазеров" (Ленинград, 1990, 1993, 1995); XIV Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике (Ленинград, 1991); International Workshop "High energy pulsed chemical lasers" (Paris, 1995); II, III, IV International Conferences Atomic and Molecular pulsed lasers (Tomsk, 1995, 1997, 1999); "XII International Symposium on gas flow and chemical lasers" and "High Power lasers conference" (St.- Peterburg, 1998).

### **Публикации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 52 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата. По материалам работы получено пять авторских свидетельств на изобретение и один патент.

## **Объем работы**

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения, списка цитируемой литературы и списка трудов автора. Работа содержит 191 страницу, включая 112 рисунков, 199 библиографических ссылок.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, кратко изложены предмет исследований и структура диссертации, сформулированы цель работы, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой Главе** представлен краткий обзор литературы, посвященный формированию в эксимерных лазерах излучения с малой расходимостью и узкой спектральной линией. В режиме свободной генерации расходимость излучения эксимерных лазеров намного превышает дифракционный предел, а ширина спектральной линии составляет десятки обратных сантиметров. Для повышения степени временной и пространственной когерентности лазерного пучка используют методы, хорошо зарекомендовавшие себя ранее в других лазерах. К таким методам относятся: формирования излучения в задающем генераторе (ЗГ) с последующем его усилением, применение неустойчивого резонатора и режима инжекционной синхронизации (ИС), использование нелинейных сред (ВРМБ и ВКР) для управления и преобразования излучения лазеров.

Формирование расходимости излучения в ЗГ обеспечивается за счет расположения в его резонаторе двух диафрагм, осуществляющих селекцию мод резонатора. При этом расходимость пучка ЗГ близка к дифракционному пределу  $\theta_d = 2,44\lambda/d$ , где  $d$  – диаметр отверстия диафрагмы,  $\lambda$  – длина волны излучения. Поскольку в эксимерных лазерах активная среда имеет высокий коэффициент усиления и реализуется малое число обходов резонатора излучением, то для уменьшения спектральной ширины линии ЗГ необходимо использовать резонаторы с высокой дисперсией и высоким контрастом полосы пропускания (эталон Фабри-Перо, решетки с числом штрихов  $> 2000$  штр/мм).

К моменту начала данной работы вышло несколько публикаций, посвященных задающим генераторам на молекулах  $KrF$  (R.T.Hawkins, H.Egger, и др. // Appl. Phys. Lett.-1980, V.36, P. 391-392) и  $HeCl$  (T.J.Pacala, I.S.McDermid, J.B.Laudenslager.// Appl. Phys. Lett.-1984, V.45, P. 507-510). Тем не менее круг вопросов, требующих ответов при создании ЗГ на молекуле  $HeCl$ , оставался весьма широким, поскольку отсутствовала информация о перестройке длины волны, уровне шума, оптимальных оптических схемах и т.д.

Использование неустойчивых резонаторов для уменьшения расходимости излучения в электроразрядных эксимерных лазерах с апертурой в единицы сантиметров показало, что они позволяют получать высокую направленность излучения (T.J.McKee, B.P. Stoicheff, S.C.Wallace. Appl. Phys. Lett., 1977, V. 30, P.278). В тоже время в широкоапертурных лазерах (апертура  $\geq 10$  см) существовали серьезные проблемы получения высокой направленности, расходимость излучения в таких лазерах превышала  $500_{\lambda}$  ( J. Goldhar, K.S. Jancatis, J. R. Murray, L. G. Schilitt, CLEO-84, Dig. Con., 1984, P. 136).

Исследования режима ИС проводились, в основном, в электроразрядных KrF лазерах с длительностью импульса 15-30 нс (J. Goldhair, J.R. Murray. // Opt. Lett. - 1977, V.1, P. 199-201). При этом были сформулированы основные принципы и условия управления параметрами излучения (I.J.Bigio, M. Slatkine. // Opt. Lett. - 1981, V.6, P. 336-338). Однако, управление параметрами излучения XeCl лазера до нас не исследовалось.

Управление параметрами излучения в схемах с использованием вынужденного рассеяния Мандельштамма-Бриллюэна (ВРМБ) также проводилось в основном с KrF лазерами. при этом сообщалось о реализации обращения волнового фронта (E. Armandillo, D.Prock. // Opt. Lett. - 1983, V.8, P. 523-525) и компрессии импульса излучения ( M.J.Damzen, and M.H.R. Hutchinson. // Opt. Lett. - 1983, V.8, P. 313-315).

Преобразование излучения эксимерных лазеров в процессе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) как в парах металлов (N. Djeu, Appl. // Phys. Lett. - 1979, V.35, P. 663-665), так и в газообразных средах (H.Kommine, E. A. Stappaerts, S.J.Brosnan. //Appl. Phys. Lett. - 1982, V. 40, P. 551-553), исследовалось ранее. Однако при этом, как правило, излучение накачки имело невысокую степень временной и пространственной когерентности. Поэтому такие параметры преобразованного излучения, как расходимость, ширина спектральной линии и спектральный состав, были далеки от значений, предсказанных теорией. Исследование ВКР с высококогерентной накачкой, в связи с этим, несомненно, представляло интерес.

В целом же, проблема формирования мощных импульсов высококогерентного излучения в УФ области спектра решалась параллельно с автором данной работы, однако при этом в основном исследовались KrF и XeF лазеры. В данной же работе решались вопросы относительно возможности повышения энергии генерации XeCl лазеров и формирования в них излучения с малой расходимостью и узкой спектральной линией. В заключение главы формулируются задачи исследований, направленные на решение выше упомянутой проблемы.

Во второй главе описана экспериментальная аппаратура, методики расчетов и измерений. В процессе выполнения настоящей работы было создано около десяти электроразрядных ХеСl лазеров с энергией генерации от 1 мДж до 10 Дж и шесть ХеСl лазеров, возбуждаемых электронным пучком, с энергией генерации от 1,5 до 200 Дж. Длительность импульсов излучения охватывала область от 20 нс до 2.2 мкс. В большинстве случаев электроразрядные лазеры имели плазменные электроды (один или два) и размер активной области  $\sim 1 \times 3 \times 70$  см. Для юстировки оптических схем был создан малогабаритный ХеСl лазер с энергией излучения в импульсе до 1 мДж при длительности  $\tau_{1/2} = 10$  нс, работающий с частотой следования импульсов до 50 Гц. В двух ХеСl лазерах использовалась рентгеновская предионизация разряда. Импульс генерации первого лазера имел энергию 1 Дж при длительности  $\tau_{1/2} = 190$  нс. В нем впервые в качестве накопителя энергии была использована электрическая линия на керамических конденсаторах. Энергия генерации второго лазера (Рис.1) составляла 10 Дж при длительности импульса  $\tau_{1/2} = 80$  нс. Лазер работал в режиме фотоиницирования разряда (без быстрого сильноточного коммутатора).

В лазерах, возбуждаемых электронным пучком, наиболее ответственным элементом является ускоритель электронов. При разработке мощных лазеров в данной работе рассматривались варианты ускорителей с системами накачки как от индуктивных так и от емкостных накопителей энергии. В одном из лазеров использовалась система накачки ускорителя электронов на основе индуктивного накопителя энергии с плазменным прерывателем. Данная схема использовалась нами впервые. Энергия генерации данного лазера составила 1.5 Дж при длительности импульса  $\tau_{1/2} = 50$  нс.

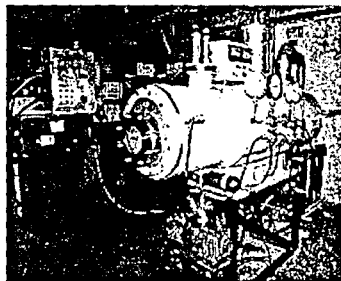


Рис.1. Электроразрядный лазер с активным объемом  $6 \times 11 \times 80$  см<sup>3</sup> и энергией генерации 10 Дж.

В остальных наших установках питание ускорителей осуществлялось от генератора импульсного напряжения (ГИН) Аркадьева-Маркса. В лазере УФЛ-10 использовался восьми-ступенчатый ГИН, собранный на конденсаторах ИК-100-0.1. Электронный пучок с плотностью тока  $8$  А/см<sup>2</sup>, длительностью на полувысоте амплитуды  $\sim 2$  мкс и максимальной энергией 300 кэВ инжектировался в лазерную камеру с одной стороны через лавсановую пленку толщиной 50 мкм. Сечение пучка было  $6 \times 100$  см<sup>2</sup>, активный объем лазера - 3 литра. На смеси Ag/Хе/ССl<sub>4</sub>(НСl) максимальная энергия генерации лазера составляла 10 Дж.

В третьей установке (УФЛ-100) также использовался ГИН, собранный на конденсаторах ИК-100-0.4 и имеющий десять ступеней. Электронный пучок ускорителя сечением  $13 \times 150 \text{ см}^2$  инжектировался в лазерную камеру через решетку с прозрачностью 80%, закрытую 40 мкм фольгой из AlMg сплава, 50 мкм титановой фольгой либо 50 мкм алюминизированным лавсаном. Выходные окна лазерной камеры имели диаметр 300 мм. Использовались также секционированные окна, состоящие из трех ячеек диаметром 90 мм. Это давало возможность работать одновременно с различной добротностью резонатора по сечению лазерного пучка. Энергия генерации ХеС1 лазера достигала 50 Дж при длительности импульса 1-1.5 мкс. На данной установке был проведен большой комплекс исследований, направленный как на поиск эффективных режимов формирования электронного пучка с параметрами, необходимыми для накачки лазера, так и на поиск эффективных режимов генерации ХеС1 лазера.

Возбуждение четвертого лазера, который представлял собой модернизацию третьего, осуществлялось уже двумя встречными электронными пучками. Питание каждого из ускорителей электронов осуществлялось от трех параллельно включаемых десяти ступенчатых ГИНов, собранных на малоиндуктивных конденсаторах КМИ-100-0.1. Электронный пучок сечение  $13 \times 150 \text{ см}^2$  инжектировался в лазерную камеру с двух сторон через 50 мкм титановые фольги. Расстояние между фольгами было 12 см. Давление рабочей смеси газов Al/Хе/НС1 составляло 3-4 атм. Энергия генерации лазера могла достигать 150 Дж при длительности импульса излучения  $\tau_{1/2} \sim 300 \text{ нс}$ .

Пятая и шестая установки представляли собой лазеры, возбуждаемые от одного либо от двух (УФЛ-100М., Рис. 2) ускорителей электронов с сечением электронного пучка  $25 \times 100 \text{ см}^2$ . В этих установках использовался генератор импульсного напряжения с вакуумной изоляцией, который располагался с вакуумным диодом в общем металлическом баке, имеющем остаточное давление  $2 \times 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$  Генератор был собран по схеме Аркадьева-Маркса и состоял из восьми ступеней. Каждая ступень имела емкость 0,5 мкФ и могла заряжаться до 100 кВ. На последней ступени генератора был расположен катод вакуумного диода размером 94x16 см. В лазере с накачкой от

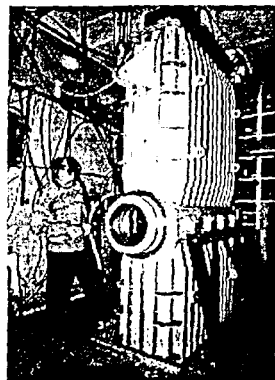


Рис.2 Лазер с активным объемом  $25 \times 25 \times 100 \text{ см}^3$ .

одного ускорителя энергия генерации была 150 Дж при длительности импульса  $\tau_{1/2} = 250$  нс. Использование двух ускорителей позволило улучшить однородность накачки и повысить выходную энергию излучения до 210 Дж.

На основе созданных лазеров была собрана усилительная система МЭЛС-4к, включающая в себя задающий генератор, электроразрядный усилитель, предусилитель и основной усилитель. Сочетание ЗГ с электроразрядным усилителем в различных оптических схемах позволяло получать разные параметры излучения на его выходе (см. Гл.6, 7, 8). В качестве предусилителя использовался электроразрядный лазер с активным объемом  $6 \times 11 \times 80$  см<sup>3</sup>, а основного усилителя - лазер с активным объемом  $25 \times 25 \times 100$  см<sup>3</sup>.

В процессе выполнения настоящей работы измерялись энергетические, спектральные, поляризационные, временные и пространственные параметры лазерного излучения. В электроразрядных лазерах энергия излучения измерялась с помощью приборов ИМО-2Н и ИКТ-1Н. Определение энергии излучения для пучка с большим сечением осуществлялось с помощью ИКТ-1Н, БКДМ (диаметр окна 160 мм) или набора калориметров ТПИ-2-7 (общей площадью  $24 \times 24$  см<sup>2</sup>). Спектр излучения регистрировался спектрографом СТЭ-1, либо изготовленным нами спектрографом с обратной линейной дисперсией 0.035 нм/мм. Ширина спектральной линии излучения определялась с помощью интерферометра ИТ28-30. Степень поляризации лазерного пучка определялась путем разделения ортогонально-поляризованных компонент клином из исландского шлата. При измерении энергетической расходимости излучения использовался метод калиброванных диафрагм, при измерении расходимости по уровню половинной интенсивности применялся автокалибровочный метод. Для измерения временных характеристик лазерного излучения использовались вакуумные фотодиоды ФК-19, 20 и ФЭК-22СПУ. Измерение электрических импульсов в экспериментах осуществлялось при помощи осциллографов И2-7, С8-2, С8-14, БЛОР-4. Все экспериментальные графики, приведенные в диссертации, построены по среднему значению из 3-4 измерений.

Юстировка оптических схем производилась с использованием He-Ne-лазеров ЛГН-102, ЛГ-78, ЛГ-52-1, юстировочного эксимерного лазера, а также при помощи коллиматоров, входящих в комплект скамьи ОСК-2Ц1. Оптические элементы, используемые в экспериментах, обычно имели высокое качество.

Кроме экспериментальных измерений нами проводились численные расчеты параметров излучения лазеров и усилителей. Характеристики лазеров, возбуждаемых электронным пучком, рассчитывались с учетом всех основных кинетических процессов в активной среде. В расчетах параметров излучения усилителей использовалась одномерная

численная модель, которая состояла из системы нестационарных уравнений для концентрации эксимерных молекул и потоков фотонов.

В третьей главе приводятся результаты исследований, целью которых являлся поиск эффективных режимов возбуждения и генерации широкоапертурных ХеСl лазеров с накачкой электрическим разрядом и электронным пучком. При этом исследовались условия реализации однородной накачки, которая очень важна при формировании в лазере высокой степени пространственной когерентности.

В электроразрядном лазере с активным объемом  $6 \times 11 \times 80 \text{ см}^3$  эффективность генерации и однородность интенсивности излучения существенно существенно зависели от дозы рентгеновского излучения, которая в экспериментах изменялась от 1 мР до 30 мР. С малой дозой наблюдалась пятнистая структура разряда, которая хорошо была видна на автографе лазерного излучения в ближней зоне. С максимальной дозой рентгеновского излучения наблюдалось однородное горение разряда и равномерное распределение интенсивности лазерного излучения. При этом энергия излучения достигала 10 Дж, а эффективность генерации (от энергии в накопителе)  $\sim 2\%$ .

Исследование эффективности генерации в ХеСl лазерах, возбуждаемых электронным пучком, показало, что она существенно зависит от мощности и однородности накачки. Для пучка с длительностью импульса тока  $\sim 2.8 \text{ мкс}$  и максимальной удельной мощностью накачки  $\leq 100 \text{ кВт/см}^3$  КПД лазера относительно вложенной в активный объем энергии был  $\sim 1.3\%$ . Увеличение мощности возбуждения до  $300 \text{ кВт/см}^3$  (при уменьшении длительности импульса тока до 1.5 мкс) в широкоапертурном лазере повысило КПД до 1.8%. Однако в обоих случаях при накачке пучком с одной стороны, за счет неоднородного распределения мощности возбуждения в лазерном объеме, невозможно было обеспечить оптимальный состав смеси и добротность резонатора для каждой области активной среды, поскольку они зависят от величины мощности накачки.

Для повышения эффективности генерации нами была увеличена мощность накачки и улучшена однородность ее распределения по активному объему. Это обеспечивалось за счет возбуждения лазера двумя встречными пучками с длительностью  $\tau_{1/2} = 350 \text{ нс}$ . Величина максимальной мощности накачки при этом составила  $430 \text{ кВт/см}^3$ , ее изменение по активному объему в области между фольгами не превышало 30%. При этом была пучена высокая однородность распределения энергии излучения по сечению лазерного пучка. Эффективность генерации лазера относительно вложенной энергии для данного режима с единицы объема составила 4%, а со всего объема 3.7%. Это значение близко к предельной эффективности ХеСl лазера, предсказываемой теорией для данной длительности (F.Kannari,

A.Suda, M.Obara, T.Fujioka // IEEE J. of Quant. Electron. – 1983, V.19, P. 1587; H.E.Cartland and T.H.Jonhson // J. Appl. Phys. 1991, V.69, P.2815).

Численные расчеты параметров генерации ХеСl лазера, возбуждаемого электронным пучком, для различных мощностей накачки в оптимальных условиях по составу смеси и добротности резонатора показали, что при длительности импульса накачки  $\tau_{1/2} = 300$  нс наибольшая эффективность генерации наблюдается в диапазоне удельных мощностей  $\sim 200\text{--}500$  кВт/см<sup>3</sup>. Полученные оптимальные условия возбуждения ХеСl лазера электронным пучком легли в основу разработки и создания в ИСЭ СО РАН лазеров с уровнем энергии генерации в импульсе 100-1000 джоулей. Использование же в ГИН вакуумной изоляции позволило повысить общий КПД этих лазеров в 1.5 раза и существенно уменьшить их габариты. Одним из таких лазеров является УФЛ-100М, Рис.2. Удельная мощность накачки в данном лазере составила 300-450 кВт/см<sup>3</sup>. КПД лазера, рассчитанный относительно всей вложенной в активный объем энергии для давления 2 атм, был равен 3%.

В лазере с активным объемом  $12 \times 16 \times 150$  см<sup>3</sup> наряду с экспериментами нами проводилось компьютерное моделирование кинетики плазмохимических реакций и параметров излучения. Полученные результаты сравнивались с экспериментом. При исследовании поведения длительности импульса генерации в зависимости от концентрации НСl было найдено, что уменьшение длительности для концентраций НСl ниже оптимальных обусловлено поведением коэффициента поглощения на таких частицах, как:  $\text{Ar}_2^+$ ,  $\text{Xe}_2^+$ ,  $\text{ArXe}^+$ . Уменьшение длительности импульса при концентрациях НСl выше оптимальных было обусловлено поглощением на частицах  $\text{Cl}^+$ ,  $\text{Xe}_2\text{Cl}^+$  и  $\text{ArXe}^+$ . Влияние содержания Хе в смеси на параметры генерации также осуществлялось в основном через коэффициент поглощения. При малых концентрациях Хе увеличивался коэффициент поглощения на молекулярных ионах, особенно на  $\text{Ar}_2^+$ . С увеличением концентрации Хе выше оптимальной возрастала скорость тушения эксимерных молекул атомарным Хе с образованием  $\text{Xe}_2\text{Cl}^+$ , который становился доминирующим в поглощении лазерного излучения.

В четвертой главе исследуются характеристики задающего генератора (ЗГ) на молекулах ХеСl в зависимости от оптической схемы, параметров накачки, состава и давления газовой смеси. Уменьшение ширины спектральной линии ЗГ осуществлялось с помощью дифракционных решеток и эталонов Фабри-Перо (ЭФП). При этом в резонаторе обычно располагалось две диафрагмы с диаметром 1.4 мм, что обеспечивало расходимость пучка ЗГ, близкую к дифракционному пределу, Рис.3. Исследование различных оптических схем с дифракционными решетками проводилось как при использовании расширяющего призмного телескопа, так и без него. Было показано, что в процессе увеличения



селективности резонатора ширина спектральной линии уменьшается пропорционально его дисперсии. При приближении к порогу генерации степень сужения линии увеличивается. Минимальная ширина линии в схеме с дифракционными решетками составила  $0.15 \text{ см}^{-1}$ .

Использование в резонаторе эталонов Фабри-Перо осуществлялось либо в комбинации с дифракционными решетками, либо без них. Комбинация одной решетки и одного эталона позволяла получать ширину линии до  $0.07 \text{ см}^{-1}$ . В то время как с двумя эталонами ширина линии уменьшалась до  $0.02\text{-}0.015 \text{ см}^{-1}$ . Лучшая ситуация в наших экспериментах была реализована при использовании двух решеток и одного твердотельного эталона. В этом случае ширина линии составила  $0.01 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует 4 продольным модам резонатора. При этом был достигнут рекордно высокий для ЗГ уровень энергии излучения  $\sim 1 \text{ мДж}$ . Импульс излучения длительностью 50 нс имел амплитудную модуляцию с периодом 12 нс (время обхода резонатора), обусловленную взаимодействием полей нескольких мод.

В случае уменьшения ширины линии только за счет эталонов предварительная селекция излучения осуществлялась эталоном с базой 0.3 мм. В этом случае ширина линии была  $0.015 \text{ см}^{-1}$ , что соответствовало 6 продольным модам резонатора. При этом импульс излучения так же имел амплитудную модуляцию.

Дискриминация поляризации (s-компонента) излучения ЗГ осуществлялась как при отражении от грани призмы-телескопа так и от решетки. В нашем диапазоне углов падения на решетку эффективность дифракции для p-поляризованного пучка была примерно в 1.3 раза выше, чем для s-компоненты. В результате, формирование линейно-поляризованного излучения в ЗГ с призмным телескопом происходило за 2-3 обхода резонатора. При этом степень поляризации выходного пучка составляла  $\sim 0.94$ . Несмотря на высокую скорость селекции p-поляризации, выходное излучение содержало и неполяризованное излучение, обусловленное существованием в резонаторе усиленного спонтанного излучения. Одной из важнейших характеристик ЗГ является уровень шума в выходном пучке. На уровень шума можно воздействовать, в основном, двумя способами - изменяя усиление активной среды, либо осуществляя фильтрацию шума. При снижении коэффициента усиления происходило

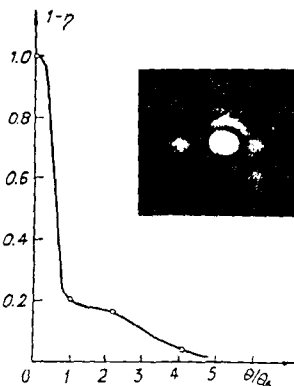


Рис.3 Распределение энергии и интенсивности в дальней зоне для пучка ЗГ.

снижение уровня шума. Фильтрация излучения нами осуществлялась по поляризации и спектру. В качестве фильтрующего элемента использовались клин из исландского шпата и воздушные ЭФП. Наиболее сильная фильтрация осуществлялась эталоном с базой 0.1 мм, поскольку для него половина области свободной дисперсии ( $\Delta\lambda/2 = 0.23$  нм) приблизительно была равна расстоянию между максимумами усиления на переходах 0-1 и 0-2. При этом энергия генерации снижалась всего на 25%. Для пучка с шириной линии  $\Delta\nu \approx 0.1$  см<sup>-1</sup> и мощностью импульса генерации 300 Вт уровень фона составил  $\sim 0.005\%$ .

**Пятая глава** посвящается исследованию возможностей формирования высокой направленности излучения и определению причин ее ограничения в лазерах на молекуле ХеС1 с неустойчивым резонатором. Наиболее распространенным типом резонатора, который используется в лазерах с высоким коэффициентом усиления, является конфокальный резонатор положительной ветви. Одним из главных условий формирования в нем дифракционной расходимости  $\theta_d$  является обеспечение определенного количества обходов резонатора  $n_d$  лазерным излучением в течение импульса генерации, согласно выражению

$$n_d = 1 + [\ln(\theta_1/\theta_d)]/\ln M, \quad (5.1)$$

где  $\theta_1 = D(1-1/M)/L$  - расходимость излучения после первого обхода резонатора,  $M$  - увеличение резонатора,  $D$  - диаметр выходной апертуры. При этом желательным условием является обеспечение насыщения коэффициента усиления активной среды за счет оптимальной добротности резонатора ( $\sim 1/M^2$ ). На практике выполнить эти два условия одновременно не всегда удается. Тем не менее, в лазерах с апертурой в единицы сантиметров при длительности импульса генерации  $\geq 100$  нс в конфокальном резонаторе удастся сформировать пучок с долей энергии в дифракционном угле до 50%.

Наибольший интерес представляло исследование расходимости в широкоапертурных лазерах. Данные исследования были проведены нами в ХеС1 лазере с активным объемом  $15 \times 13 \times 150$  см<sup>3</sup>. Эксперименты показали, что при оптимальном по энергии увеличении резонатора  $M = 4$ , основная энергия излучения содержится в угле  $\sim 1$  мрад (что в 200 раз превышает дифракционный предел). При  $M = 8.5$  наблюдалась максимальная осевая интенсивность, а при  $M = 18$  минимальная расходимость по уровню половины энергии генерации. При значениях  $M > 18$  расходимость излучения начинала увеличиваться. Такое поведение расходимости было совершенно не характерно для эксимерных лазеров с апертурой в единицы сантиметров, и, скорее всего, являлось особенностью мощных широкоапертурных лазеров. Для выяснения причин, ограничивающих достижение минимальной расходимости, было проведено исследование динамики формирования

излучения в различных углах. Эксперименты показали, что формирование излучения в малом угле происходит медленнее, чем в большом. В течение импульса наблюдалась ситуация, когда интенсивность излучения в больших углах начинала увеличиваться, а в малых одновременно уменьшаться, что прямо противоречило теории. Это могло быть связано с ростом интенсивности потоков, отраженных от вогнутого зеркала и первоначально сходящихся к центру под разными углами к оси резонатора. В результате инверсная населенность в центральной области оказывалась меньше, чем в остальном объеме, и процесс выделения основной моды резонатора замедлялся. При значениях  $M > 18$ , несмотря на высокую скорость пространственной селекции, имеющейся обратной связи, могло оказаться недостаточно, чтобы излучение основной моды эффективно снимало инверсию во всем активном объеме. Для увеличения  $M < 8$  величина обратной связи возрастала, но вместе с этим увеличивалось и время формирования основной моды.

Уменьшить интенсивность потоков, сходящихся к центру активной области, можно при замене заднего вогнутого зеркала на плоское (обобщенный параметр  $g = 1 - L/R = 1$ ) или выпуклое ( $g > 1$ ). В этом случае размер зеркал становится много меньше лазерной апертуры. Для резонатора с двумя выпуклыми зеркалами в ближней зоне нами отчетливо наблюдалась дифракция выходного излучения на зеркалах резонатора и оптических неоднородностях в окнах лазерной камеры, что свидетельствовало о высокой пространственной когерентности пучка, Рис.4. Вместе с тем из наших измерений ~ 50% энергии пучка содержалось в угле  $5 \times 10^{-5}$  рад, который соответствовал 10 дифракционным углам и был близок к пределу разрешения нашей измерительной аппаратуры для данного размера пучка ( $3 \times 10^{-5}$  рад). В связи с этим были проведены измерения расходимости части лазерного пучка с  $\varnothing = 75$  мм, для которого измерения можно считать более корректными. Для последнего типа резонатора при этом отчетливо регистрировался дифракционный керн с угловым размером  $10^{-5}$  рад, в котором содержалось около 50% энергии излучения.

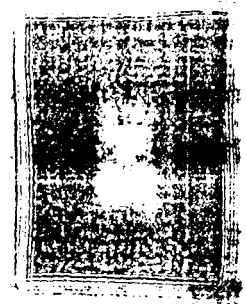


Рис.4 Автограф выходного излучения размером 15x20 см для случая  $g_1 > 1, g_2 > 1$ .

В Таблице 5.1 приведены характеристики излучения для исследуемых резонаторов. Видно, что наибольшая яркость излучения реализуется для последнего типа резонатора.

При использовании резонатора с дифракционным выводом выходное излучение в ближней зоне является неоднородным за счет дифракции и тени от выходного зеркала, Рис.4.

Таблица 5.1

Тип Резонатора	Энергия генерации E, Дж	Часть лазерного пучка с $\varnothing = 75$ мм		Весь лазерный пучок	
		Доля энергии в $\theta_k$ , %	0 код. 0.5E, мрад	Яркость, Вт/см <sup>2</sup> ср	
Плоско-парал.	40	-	-	2.7	$9 \times 10^{10}$
Конфокальный	20	13	0.04	0.07	$6 \times 10^{13}$
$g_1 < 1, g_2 = 1$	15	25	0.03	0.06	-
$g_1 > 1, g_2 > 1$	10	55	0.01	0.05	$3 \times 10^{15}$

Для получения лазерного пучка с однородным распределением интенсивности в ближней зоне нами использовался неустойчивый резонатор, в котором выходное зеркало было полупрозрачным и имело супергауссовый профиль коэффициента отражения. С таким резонатором в электроразрядном лазере с длительностью импульса  $\tau_{1/2} = 110$  нс было получено излучение с распределением интенсивности близким к однородному и содержащим в дифракционном угле 60% энергии.

В шестой главе приводятся результаты экспериментального исследования режима инжекционной синхронизации (ИС) в XeCl лазерах, возбуждаемых электрическим разрядом и электронным пучком. В качестве критерия управления выходным излучением УЛ нами был выбран спектр лазерного излучения. Для определения степени перераспределения энергии излучения между двумя сильными линиями в режиме ИС была введена энергетическая эффективность управления

$$\eta_E = 1 - A_{0-1}B_{0-2}/A_{0-2}B_{0-1}, \quad (6.1)$$

где  $A_{0-1}$  и  $A_{0-2}$  - есть энергия излучения на переходе 0-1 и 0-2 в режиме свободной генерации,  $B_{0-2}$  и  $B_{0-1}$  - энергия излучения на переходе 0-2 и 0-1 в режиме ИС. Детальное исследование условий управления в электроразрядных лазерах показало, что величина  $\eta_E$  превышает 90% только при интенсивности входного сигнала выше некоторого его порогового значения, которая для неустойчивого резонатора была  $I_{пор} = 0,08$  Вт/см<sup>2</sup>. Значение  $I_{пор}$  зависело от типа и параметров резонатора, от точности его юстировки. Степень заполнения активной области УЛ внешним сигналом влияла на эффективность ИС. Максимальная величина отношения выходной интенсивности к входной в режиме ИС была  $\sim 1,2 \times 10^7$ . Исследование режима ИС в широкоапертурном лазере, имеющего длительность импульса  $\tau_{1/2} = 250$  нс, показало возможность эффективного управления спектральным составом его излучения. Рис.5. При этом на инжектируемой линии 0-2 наблюдалось до 90% энергии. Неполное

заполнение активной среды внешним сигналом на отрезке времени от начала накачки до начала генерации в приосевой области приводило к полной потере управления спектром, а на ее периферии к снижению эффективности в течение импульса генерации.

Исследование управления расходимостью излучения в режиме ИС показало, что в электроразрядных УЛ при увеличении длительности импульса с 20 до 100 нс оно уменьшается. В широкоапертурном лазере с длительностью импульса 250 нс в режиме ИС в фокальном пятне исчезали "спутники", присутствующие в режиме свободной генерации.

За счет этого осевая интенсивность в дальней зоне возрастала, однако крылья диаграммы направленности практически не изменялись.

Управление поляризационными

характеристиками выходного излучения электроразрядного ХеСl лазера (длительность импульса 60 нс) с неустойчивым резонатором показало, что степень линейной поляризации в начале импульса высока, но затем уменьшается к концу импульса. Анализ таких факторов деполаризации, как: генерация в УЛ фоновой компоненты, соответствующей другой спектральной линии, деполаризация в активной среде, деполаризация на резонаторной оптике, показал, что основное влияние на поляризацию оказывал последний фактор.

В седьмой главе исследуется процесс формирования мощных импульсов излучения с расходимостью близкой к дифракционному пределу в ХеСl усилителях, возбуждаемых электрическим разрядом и электронным пучком. Расходимость излучения при усилении пучка ЗГ определялась искажениями его волнового фронта в оптическом тракте и величиной УСН. Искажения в активной среде могут быть обусловлены различной электронной плотностью, аномальной дисперсией, изменением химического состава среды, турбулентностью и т.д. Оценки таких искажений в условиях изменения накачки усилителей от максимальной ее величины (в центре среды) до нуля (на краю среды) показали, что их суммарное влияние может приводить к разнице в набеге фазы волны  $\Delta\varphi \sim \lambda$ . Эксперименты же показали, что при однородной накачке в электроразрядных усилителях (диаметр пучка до 5 см) можно усиливать излучение практически без искажений. При неоднородной накачке (появление штевидной структуры, стягивание в узкую область) происходило уширение диаграммы направленности в поперечной плоскости разряда. При усилении пучка ЗГ с

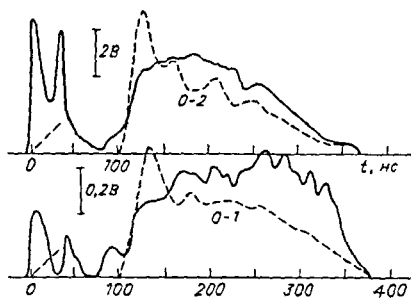


Рис.5 Осциллограммы импульсов излучения лазера УФЛ-100 в режиме свободной генерации (пунктир, 2 В/дел) и ИС на линии 0-2.

диаметром 1.5 мм. имеющего неоднородное распределение интенсивности за счет дифракции на выходной диафрагме, в условиях насыщения даже для однородной активной среды усилителя наблюдалось существенное увеличение энергетической расходимости выходного излучения.

Расходимость излучения на выходе усилителя с накачкой электронным пучком была исследована для различных диаметров пучка, при этом отслеживалось поведение дифракционного зерна. Для пучка с диаметром 35 мм практически не наблюдалось каких-либо искажений волнового фронта. Рис. 6.а. При диаметре 75 мм часть лазерной энергии начинала рассеиваться из дифракционного зерна в крылья диаграммы направленности, однако дифракционный керн с угловым размером 10 мкрад сохранялся. Усиление пучка с диаметром 150 мм (Рис.6.в) приводило к существенным изменениям распределения интенсивности, однако при этом основные искажения волнового фронта пучка происходили не в активной среде, а в тракте регистрации (длина пути в воздухе ~ 25 м). При уменьшении длины тракта регистрации искажения были уже не столь большими и были обусловлены, в основном, aberrациями на согласующем телескопе. Рис.6 (г). Для всех исследуемых размеров пучка распределение интенсивности в дальней зоне исходного и усиленного

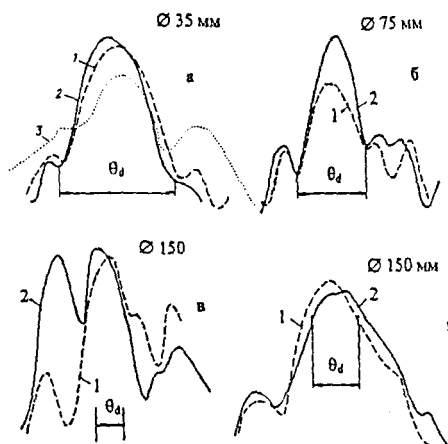


Рис.6 Денситограммы фокальных пятен исходного (1) и усиленного (2) излучения.

усилителей лазерной системы МЭЛС-4к проводился их расчет с учетом влияния УСИ. При этом было найдено, что для насыщения предусилителя на двух проходах необходимо обеспечивать на входе плотность мощности ~ 4 кВт/см<sup>2</sup>. В основном усилителе входная интенсивность (при одном проходе) должна быть не менее 10 кВт/см<sup>2</sup>. Форма импульса

излучения были близки друг к другу. Это говорит о том, что активная среда усилителя является достаточно однородной и не влияет на волновой фронт усиливаемого излучения. Следует отметить, что расходимость излучения ЗГ, прошедшего среду усилителя через несколько секунд после его срабатывания резко увеличивалась, Рис.6.а(3), что было обусловлено искажением волнового фронта пучка на флуктуациях плотности рабочей среды.

Для определения предварительных выходных параметров широкоапертурных

усиленного излучения могла изменяться в зависимости от формы импульса накачки и от параметров активной среды.

Экспериментальные результаты, полученные при усилении пучка ЗГ с длительностью импульса  $\tau_{1/2} = 80$  нс в лазерной системе МЭЛС-4к, приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1

Параметры	1 каскад	2 каскад	3 каскад		4 каскад	
			4x5	5x6	10x12	21x25
А, см	$\varnothing = 0.6$	1.2x1.8	4x5	5x6	10x12	21x25
$E_{вх}$ , Дж	-	0.003	0.03	0.03	0.8	1.2
$E_{вых}$ , Дж	0.005	0.08	1.0	1.5	10	25
$E_{д}/E_{вых}$	0.82	0.77	0.6	0.5	~0.1	-

Где: А – размер пучка на выходе усилителя.  $E_{вх}$ ,  $E_{вых}$  – входная и выходная энергии,  $E_{д}$  – энергия, содержащаяся в дифракционном угле  $\vartheta_{д}$ . Первый каскад представлял из себя ЗГ и однопроходный усилитель (усиление в незадействованной части той же активной среды), второй каскад – двухпроходный электроразрядный усилитель, третий каскад – предусилитель, четвертый каскад – основной усилитель. Как видно из таблицы, расходимость излучения на выходе 1 каскада была близка к дифракционному пределу. Увеличение расходимости излучения после второго каскада по сравнению с первым было обусловлено присутствием в пучке некоторой доли УСИ. Активная среда 3 каскада не влияла на расходимость усиленного излучения, наблюдаемое же небольшое увеличение расходимости было вызвано искажениями в воздухе и на оптических элементах. Измерения расходимости пучков большого сечения осложнялись наличием турбулентных потоков в атмосфере. По этой причине величина  $E_{д}/E_{вых}$  для пучка размером 10x12 см указана лишь приблизительно, более точно можно лишь сказать, что около 50% энергии содержалась в угле  $5 \times 10^{-5}$  рад. Какого-либо влияния неоднородности активной среды основного усилителя на расходимость усиленного излучения в экспериментах не наблюдалось.

В восьмой главе исследуются возможности использования ВРМБ и ВКР для управления временными, спектральными и пространственными характеристиками ХеСІ лазера. Исследование условий обращения волнового фронта (ОВФ) за счет ВРМБ проводилось с шириной линии пучка накачки  $\Delta\nu = (0.2 - 0.01) \text{ см}^{-1}$ . При этом в рассеянном сигнале при “жесткой” фокусировке в основном наблюдалось вынужденное температурное рассеяние (ВТР), а при увеличении фокусного расстояния – ВРМБ. Наиболее высокая

точность ОВФ нами была реализована при максимальной доле в рассеянном сигнале ВРМБ. Измерение коэффициента отражения от ВРМБ-зеркала показало, что он зависит от интенсивности и ширины линии накачки, его величина может достигать 90%. Наличие в экспериментах ОВФ подтверждалось восстановлением в стоксовом пучке структуры маски, изображение которой сохранялось в диапазоне интенсивностей накачки  $1 - 10 \text{ ГВт/см}^2$ .

В работе также исследовалась возможность ОВФ для пучка накачки ХеСл лазера без спектральной селекции. При этом пучок задающего генератора имел линейную поляризацию и расходимость близкую к дифракционному пределу. Наибольший коэффициент отражения падающего пучка от ВРМБ-среды наблюдался при интенсивности  $I$ , близкой к критическому значению для наших условий  $I_{кр} = 16 \text{ ГВт/см}^2$ . Однако наибольшее значение коэффициента качества ОВФ было получено при  $I \sim 100 \text{ МВт/см}^2$ . При этом наблюдалось частичное восстановление маски. Регистрация спектра стоксова сигнала при интенсивности накачки  $\sim 100 \text{ МВт/см}^2$  показала, что ширина линии на половине интенсивности составляет  $0.3 - 0.5 \text{ см}^{-1}$ . Центр линии приходился на электронный переход 0-1 молекулы ХеСл. Обнаруженный эффект селекции излучения был использован для повышения когерентности излучения

ХеСл лазера согласно оптической схемы Рис.7. Затравочный сигнал для ВРМБ зеркала при этом формировался из спонтанных шумов за два прохода активной среды. Нелинейная среда на первом этапе выполняла функцию спектрального и пространственного селектора, а затем работала как ОВФ

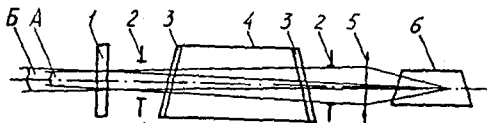


Рис.7 Оптическая схема лазера: 1 - выходное зеркало; 2 - диафрагма диаметром 1 см; 3 - просветленные окна; 4 - лазерная камера; 5 - линза с фокусным расстоянием 10 см; 6 - кювета с гептаном.

зеркало. Выходное излучение лазера состояло из двух пучков: сходящегося (А) и расходящегося (Б). Временная форма излучения представляла собой цуг импульсов, чередующихся для сходящегося и расходящегося пучков и отстоящих друг от друга на время обхода резонатора. Генерация наблюдалась на переходе 0-1 молекулы ХеСл со спектральной шириной линии импульса в цуге  $\sim 0.3 \text{ см}^{-1}$ . Частота каждого последующего импульса в цуге была смещена относительно предыдущего на  $0.3 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует спектральному сдвигу ВРМБ. Общая энергия генерации лазера составляла 10 мДж. Выходное излучение содержало в дифракционном угле  $\theta_d = 0.07$  мрад 30% энергии.



Для импульса излучения с длительностью  $\tau_{1/2} = 20$  нс в кювете с  $SF_6$  исследовались условия компрессии. Минимальная длительность импульса, полученная для пучка с  $\Delta\nu = 0.01 \text{ см}^{-1}$  в результате компрессии, составила  $\tau_{1/2} = 1.5$  нс. Коэффициент передачи энергии из пучка накачки в стоков импульс составил при этом 0.45, энергия усиленного стокова импульса равнялась 7 мДж. Усиленный короткий стоков импульс имел практически то же распределение энергии по углам, что и пучок накачки, за исключением меньшей доли энергии в крыльях диаграммы направленности.

ВКР в парах металлов исследовалось в парах свинца, бария и туллия. Кювета для паров металла была изготовлена из бериллиевой керамики и имела длину 45 см и диаметр 15 мм. В таблице 8.1 приведены основные физические параметры рабочих переходов атомов, оптимальные температуры паров, энергетические и квантовые эффективности, энергии излучения ВКР для используемых металлов, полученные в наших экспериментах.

Таблица 8.1

Элемент	Переход	$\lambda_{\text{ВКР}}$ , нм	$\Delta\nu$ , $\text{см}^{-1}$	T, °C	$\eta_E$ , %	$\eta_Q$ , %	E, мДж
Ba	$7p^1P_1 - 5d^1D_2$	475	50	1190	17	25	12
Pb	$^3P - ^3P_1$	458	2100	1320	62	92	35
Tm	$^2D_{1/2} - ^2F_{1/2}$	422	-4	1180	12	18	8

Плотность пучка накачки для ВКР в свинце была на 2-3 порядка выше, чем в парах других элементов. Исследование поглощения пучка накачки в парах показало, что для паров Pb при оптимальных температурах поглощение практически отсутствует в отличие от паров Tm и Ba. Измерение энергии излучения ВКР в свинце показало, что с шириной линии  $\Delta\nu = 0.1 \text{ см}^{-1}$  и  $\Delta\nu = 0.01 \text{ см}^{-1}$  эффективность преобразования при оптимальной температуре возрастала примерно вдвое по сравнению с широкополосной накачкой, при этом пучок накачки содержал в дифракционном угле около 60% энергии. Для пучка накачки с  $\Delta\nu = 0.01 \text{ см}^{-1}$  ширина линии ВКР на  $\lambda = 458$  нм составляла  $0.05-0.06 \text{ см}^{-1}$ . Расходимость преобразованного излучения увеличивалась по отношению к расходимости пучка накачки с ростом температуры и интенсивности накачки. При накачке излучением XeCl лазера, возбуждаемого электронным пучком, максимальная энергия излучения на выходе ВКР кюветы с парам свинца составила 1 Дж.

ВКР в водороде исследовалось для широкого набора параметров пучка накачки. Максимальная эффективность преобразования во все стоковы компоненты наблюдалась в области давлений 2-4 атмосферы. При этом формирование высших стоковых компонент

происходило как в процессе комбинированного преобразования, так и за счет четырехволнового параметрического взаимодействия (ЧПВ). Для устранения ЧПВ и реализации чисто каскадного механизма формирования стоксовых компонент нами была использована низкочастотная коллимированная накачка. При давлении водорода 8 атм выходе кюветы наблюдалось только излучение первой колебательной стоксовой компоненты  $S_1$  ( $\lambda = 353,45$  нм) и накачки. Эффективность преобразования энергии в  $S_1$  составила 95%. Расходимость излучения  $S_1$  зависела от интенсивности накачки и давления водорода. Вблизи порога его расходимость была близка к дифракционному пределу.

Спектральный состав ВКР зависел, прежде всего, от интенсивности излучения накачки и состояния ее поляризации. При линейно поляризованном или деполаризованном излучении и максимальной интенсивности накачки спектр состоял из четырех стоксовых и двух антистоксовых компонент.

Вблизи каждой компоненты наблюдались интенсивные спутники, обусловленные рассеянием предыдущей компоненты или волны накачки.

При циркулярно-поляризованной накачке исчезали спутники, окружающие колебательные

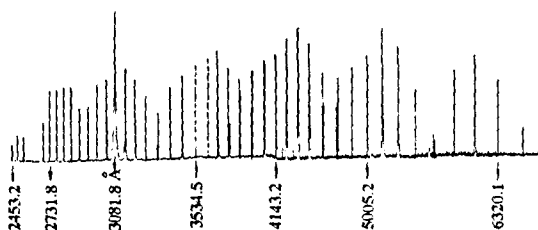


Рис.8 Денситограммы спектра ВКР в водороде при циркулярной поляризации пучка накачки ХеСІ лазера.

линии, и появлялись новые вращательные линии и их спутники. Максимальное количество линий от УФ до ИК области спектра (около 70) наблюдалось при оптимальных условиях для высших колебательных стоксовых компонент, Рис.8. Минимальная ширина каждой спектральной линии ВКР повторяла спектральный профиль линии накачки. Максимальная энергия преобразованного излучения в первую и вторую стоксовы компоненты, полученная в работе, составила 2.2 и 1.7 Дж, соответственно.

В заключении формулируются основные выводы работы.

1. Для эффективной генерации ХеСІ лазера с уровнем энергии 100 Дж и более при возбуждении электронным пучком длительностью импульса на полувысоте амплитуды  $\sim 300$  нс необходимо обеспечивать однородную накачку (степень неоднородности менее 30%) с удельной мощностью  $\sim 200 - 400$  кВт/см<sup>3</sup>.

2. Оптимальный состав смеси в ХеСІ лазере с накачкой электронным пучком зависит от мощности накачки и определяется в основном поглощением лазерного излучения частицами его активной среды.

3. Величина минимальной расходимости излучения в широкоапертурных эксимерных лазерах с плоскопараллельным и неустойчивым конфокальным резонатором положительной ветви определяется потоками усиленного спонтанного излучения. При использовании неустойчивого резонатора с обобщенными параметрами  $g_1 > 1$  и  $g_2 > 1$  расходимость излучения ограничивается неоднородностью активной среды.

4. Для эффективного управления параметрами излучения электроразрядного ХеСІ лазера в режиме ИС необходимо обеспечивать в его активном объеме интенсивность внешнего сигнала не менее  $0.1 \text{ Вт/см}^2$ .

5. В широкоапертурном ХеСІ лазере с длительностью импульса 250 нс в режиме ИС возможно эффективное управление спектральным составом излучения. При этом неполное заполнение активной среды внешним сигналом на отрезке времени от начала накачки до начала генерации в приосевой области приводит к полной потере управления спектром, а на ее периферии к снижению эффективности в течение импульса генерации.

6. При усилении дифракционного пучка задающего генератора в ХеСІ лазерной системе с выходной апертурой  $25 \times 25 \text{ см}$  наибольшее влияние на расходимость излучения оказывают турбулентные потоки в рабочей среде и на участках его транспортировки в воздухе.

7. Активная среда ХеСІ усилителя, возбуждаемого электронным пучком, позволяет без искажений волнового фронта усиливать излучение с расходимостью  $\sim 10$  мкрад.

8. Взаимодействие со средой ВРМБ излучения ХеСІ лазера с низкой степенью когерентности интенсивностью  $\sim 100 \text{ МВт/см}^2$  позволяет рассеивать высококогерентное излучение. Использование это явления в ХеСІ лазере с резонатором, образованным полупрозрачным выходным зеркалом и средой ВРМБ, позволяет формировать в нем узкополосное излучение ( $\Delta\nu = 0,3 \text{ см}^{-1}$ ) с малой расходимостью (30% энергии в  $\theta_d$ ).

9. При ВКР высококогерентного пучка ХеСІ лазера в парах свинца и сжатом водороде экспериментально достигнута квантовая эффективность преобразования в одну стоксову компоненту 92 и 95%, соответственно. В водороде реализовано до 70 вращательно-колебательных компонент, ширина спектральной линии стоксов составила  $0.01 \text{ см}^{-1}$  а расходимость преобразованного излучения была близка к дифракционному пределу. В парах

свинца расходимость ограничивалась величиной в несколько  $\theta_d$ , а ширина спектральной линии уровнем  $0,05 \text{ см}^{-1}$ .

Совокупность полученных экспериментальных и расчетно-теоретических результатов, их анализ и сделанные выводы представляют из себя новое крупное достижение в развитии физики процессов формирования мощных лазерных импульсов УФ излучения с высокой степенью временной и пространственной когерентности.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. ХеСl-лазер, возбуждаемый пучком электронов / *Ю.И. Бычков, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, В.Ф. Тарасенко* // Письма в Журн. техн. физ. – 1977. - Т. 3, вып. 23. – С. 1233-1236.
2. ХеСl-лазер с разрядом, поддерживаемым электронным пучком / *Ю.И. Бычков, Н.В. Карлов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, А.М.Прохоров, В.Ф. Тарасенко* // Письма в Журн. техн. физ. –1978. - Т.4, вып.2. – С. 83-86.
3. Экспериментальные лазеры на молекулах ХеF и ХеСl // *Ю.И. Бычков, И.И.Коновалов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, В.В.Рыжов, В.Ф.Тарасенко* // Изв. Академии Наук СССР. сер. Физическая. – 1978. – Т.42. №12. – С.2493-2498.
4. Effective ХеСl laser performance conditions with combined pumping / *Yu.I. Bychkov, A.I.Gorbatenko, V.F.Losev, G.A.Mesyats, V.F.Tarasenko* // Optics Communications. – 1979. - Vol. 30, №2. - P. 224-226.
5. *Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф., Бычков Ю.И.* Генерация на молекуле ХеСl при возбуждении электронным пучком // Квантовая электроника. - 1979. - Т. 6, № 7. - С. 1561-1564.
6. *Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф.* Генерация в смеси Аг-Хе при комбинированной накачке // Квантовая электроника. – 1980. - Т. 7, вып.3. – С. 663-664.
7. Генерация на молекулах ХеСl\* и ХеF\* при комбинированной накачке в лазере с активным объемом 28 литров / *Ю.И. Бычков, И.И. Коновалов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, А.М. Прохоров, И.И. Сисакян, В.Ф. Тарасенко, А.Г. Филонов* // Письма в Журн. техн. физики. - 1980. - Т. 6, №24. - С. 1483-1487.
8. Мощная генерация в смеси Аг:Хе при возбуждении пучком электронов микросекундной длительности / *Ю.И. Бычков, В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, Е.И. Тельминов* // Письма в Журн. техн. физ. - 1982. - Т.8, вып.14. – С. 837-840.
9. Special features of electron-beam-excited ХеСl-laser generation / *Y.I. Bychkov, V.F. Losev, G.A. Mesyats, V.S. Skakun, V.F. Tarasenko* // Optics Communications. – 1982. - Vol. 42, №4. - P. 278-280.
10. Формирование сверхточечных электронных пучков большой апертуры / *Э.И. Абдуллин, И.И. Коновалов, В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, С.М. Чесноков* // Журн. техн. физ. – 1982.- Т. 52, вып.5. – С. 929-934.
11. ХеСl-лазер, возбуждаемый микросекундным электронным пучком / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, И.И. Коновалов, В.Ф. Лосев, В.Ф. Тарасенко, Е.И. Тельминов* // Квантовая электроника. – 1983. – Т.10, №7. – С. 1510-1512.

12. Характеристики генерации ХеСl-лазера с рентгеновской предионизацией в квазистационарном режиме возбуждения / *Ю.И. Бычков, М.Л. Вишник, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев* // Квантовая электроника. – 1985. - Т.12, №10. – С. 2174-2176.
13. Управление ХеСl-лазером с помощью внешнего сигнала интенсивностью менее 2 Вт/см<sup>2</sup>/ *Ю.И. Бычков, М.Л. Вишник, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев* // Квантовая электроника. – 1987. - Т.14, №5. - С. 957-958.
14. Исследование характеристик генерации ХеСl-лазера, возбуждаемого электронным пучком микросекундной длительности / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц, В.В. Рыжов* // Квантовая электроника. – 1987. – Т.14, №5. – С. 953-956.
15. Возбуждение лазера на галогенидах благородных газов электронным пучком микросекундной длительности / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, Н.И. Коновалов, В.Ф. Лосев* // Квантовая электроника. – 1987. - Т.14, №4. – С. 664-669.
16. *Бычков Ю.И., Вишник М.Л., Лосев В.Ф.* Электроразрядный лазер с энергией генерации 1 Дж и к.п.д. 2,6% // Квантовая электроника. – 1987. – Т.14, №8. – С. 1582-1584.
17. ХеСl-лазер с энергией генерации 150 Дж / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, Г.А. Месяц* // Письма в Журн. техн. физ. – 1988. - Т.14, №6. – С.566-569.
18. *Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Ускоритель электронов с индуктивным накопителем энергии и плазменным прерывателем тока, как источник накачки газовых лазеров // Журн. техн. физ. –1989. - Т.59, вып.8. – С. 75-77.
19. Влияние состава смеси на характеристики ХеСl-лазера, возбуждаемого электронным пучком / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, В.В. Рыжов, И.Ю. Турчановский, А.Г. Ястремский* // Квантовая электроника. – 1990. - Т.17, №3. – С. 300-303г.
20. *Коваленко С.Е., Лосев В.Ф., Панченко Ю.И.* Узкополосный ХеСl-лазер с внутррезонаторным призмным телескопом // Журн. прикл. спектр. –1990. - Т.52, №4. – С. 687-689.
21. *Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Пространственно - временные характеристики излучения мощного ХеСl-лазера с неустойчивым телескопическим резонатором // Квантовая электроника. – 1990. - Т.17, №12. – С. 1634-1636.
22. *Бычков Ю.И., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Использование вынужденного рассеяния для улучшения пространственных характеристик мощного ХеСl-лазера // Квантовая электроника. – 1991. –Т.18, №6. – С.693-694.
23. Эффективность преобразования излучения ХеСl-лазера в ВКР на парах металлов / *Ю.И. Бычков, Н.Г. Иванов, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.И. Панченко, В.Е. Прокопьев* // Журн. прикл. спектр. – 1991. - Т.55, №1. – С. 80-83.

24. *Панченко Ю.Н., Коваленко С.Е., Лосев В.Ф.* Компактный электроразрядный ХеСl-лазер с высоким качеством излучения // Приборы и техника эксперимента. – 1991. - №3. – С. 150-152.
25. Характеристики излучения лазеров на молекулах ХеСl в режимах управления внешним сигналом / *Ю.Н. Бычков, Н.Г. Иванов, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко, А.И. Черников* // Томск, 1991. – (Препринт / Томск. науч. цетр Сиб. Отд-ния АН СССР, №42).
26. *Коваленко С.Е., Лосев В.Ф.* Управление расходимостью ХеСl лазера в режимах усиления // Томск. 1991. – (Препринт / Томск. науч. цетр Сиб. Отд-ния АН СССР, №33).
27. Режим инжекционной синхронизации в мощном ХеСl-лазере / *Ю.Н. Бычков, Н.Г. Иванов, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко* // Квантовая электроника. – 1992. – Т.19, №2. – С.133-135.
28. Задающий генератор на молекулах ХеСl с малым уровнем фона / *Ю.Н. Бычков, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко* // Журн. прикл. спектр. – 1992. -Т. 56, №3. – С. 499-502.
29. *Бычков Ю.Н., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н.* Экспериментальное исследование эффективности ОВФ пучка ХеСl-лазера при ВРМБ // Квантовая электроника. – 1992. – Т.19, №7. – С. 688-690.
30. *Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н.* Компрессия импульса излучения ХеСl-лазера за счет ВРМБ // Квантовая электроника. – 1994. - Т.21, №1. – С. 1-2.
31. *Kovalenko S.E., Losev V.F., Perrone M.R.* Super-Gaussian resonators for long-pulse ХеСl lasers // J. Appl. Optics. – 1994. – Vol. 33, No. 18. – P. 4082-4086.
32. Efficiency of conversion of ХеСl laser radiation for SRS in metal vapor and hydrogen gas / *Yu.I. Vyshkov, N.G. Ivanov, S.E. Kovalenko, V.F. Losev, Yu.N. Panchenko, V.E. Prokop'ev* // J. of Russian Laser Research. – 1994. - V.15, №1. - P.18-24.
33. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Повышение яркости излучения ХеСl лазера с апертурой 20 см // Томск, 1994. – (Препринт / Томск. науч. цетр Сиб. Отделения АН СССР, №2).
34. *Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н.* Особенности вынужденного рассеяния широкополосного излучения ХеСl-лазера // Квантовая электроника. – 1995. –Т.22, №5. - С. 473-474.
35. *Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н.* Формирование качественного излучения ХеСl-лазера в резонаторе с ВРМБ зеркалом // Квантовая электроника. – 1995. - Т.22, №5. – С. 475-476.

36. Лазерная система на молекулах XeCl с высокой спектральной яркостью излучения / *Н.Г. Иванов, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко* // Оптика атмосферы и океана. - 1995. - Т.8, №11. - С.1590-1594.
37. О спектральной яркости излучения ВКР пучка XeCl-лазера в парах металлов / *Н.Г. Иванов, С.Е. Коваленко, В.Ф. Лосев, Ю.Н. Панченко, В.Е. Прокопьев* // Оптика атмосферы и океана. - 1996. - Т.9, №2. - С. 211-216.
38. *Иванов Н.Г., Лосев В.Ф.* Формирование минимальной расходимости излучения в XeCl лазере с апертурой 12×16 см // Квантовая электроника. - 1996. - Т.23, № 9. - С. 1-4.
39. On the spectral brightness of the SRS radiation excited in metal vapors by a XeCl laser / *N.G. Ivanov, S.E. Kovalenko, V.F. Losev, Yu.N. Panchenko and V.E. Prokop'ev* // J. of Russian Laser Research. -1996. - Vol.17, №4. - P.401-405.
40. XeCl-лазер с энергией генерации 200 Дж / *Н.Г. Иванов, В.Ф. Лосев, Э.Н. Наиз, В.В. Рыжов, И.Ю. Турчановский, А.Г. Ястремский* // Квантовая электроника. - 1997. Т. 24, № 8. - С. 688-690.
41. *Лосев В. Ф., Панченко Ю.Н.* Длительность стока сигнала при ВРМБ излучения XeCl лазера // Квантовая электроника. - 1997. Т. 24, № 9. - С. 812-813.
42. *Losev V.F., Panchenko Yu.N.* Spectral and spatial selection of XeCl laser radiation by an SBS mirror // Optic Communications. - 1997.-Vol. 136.- P. 31-34.
43. *Ivanov N.G, Losev V. F., and Panchenko Yu. N.* Influence of the optical aberration type on the accuracy of wave front inversion at stimulated Brillouin scattering of a XeCl-laser beam // Atmos. Oceanic Opt. - 1997. - Vol. 10, № 9. - P. 646-649.
44. Панченко Ю.Н., Лосев В.Ф. Способ получения узкополосного излучения с малой расходимостью в эксимерном лазере // Патент РФ, № 2077756. 1997.
45. Формирование основной моды излучения импульсно-периодического XeCl лазера и уменьшение его расходимости / *В.В. Осипов, А.Н. Орлов, К.В. Боянов, В.Ф. Лосев* // Оптика атмосферы и океана.- 1998.- Т.11, №2-3.- С.100-104.
46. XeCl-лазер с энергией генерации 200 Дж / *Н. Г. Иванов, В. Ф. Лосев, Э. И. Наиз, В. В. Рыжов, И. Ю. Турчановский, А. Г. Ястремский* // Оптика атмосферы и океана. - 1998. -Т.11, №2-3. - С.145-148.
47. *Losev V.F., Panchenko Yu. N.* Use of Brillouin scattering in excimer lasers // Proceedings of SPIE.-1998.- Vol.3403.- P. 46-54.
48. *Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н.* Длительность стока сигнала при ВРМБ излучения XeCl лазера // Оптика атмосферы и океана.- 1998.- Т.11, №2-3.- С. 288-291.

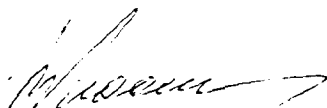


49. *Losev V. F., Ivanov N. G., Panchenko Y. N.* High quality beam formation in wide aperture excimer lasers and laser systems // Proceeding SPIE. – 1998. – Vol. 3574. – P. 104-111.

50. ХеС1 лазерная система с выходной апертурой 25x25 см / *Н. Г. Иванов, В. Ф. Лосев, Ю.Н.Панченко, А.Г.Ястремский* // Квантовая электроника. - 1999. Т. 29. № 1. - С. 1-5.

51. *Лосев В.Ф., Иванов Н.Г., Панченко Ю.Н.* Формирование высококогерентного излучения в широкоапертурном эксимерном лазере // Изв. Вузов Физика. – 1999.- Т.42. - №8.- С.54-57.

52. *Н.Г.Иванов, В.Ф.Лосев, В.Е.Проконьев.* Преобразование высококогерентного излучения ХеС1 лазера при ВКР в газообразном водороде // Оптика атмосферы и океана. - 1999. -Т.12. № 11. – С.1-8.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'N. G. Ivanov', written in a cursive style.