

На правах рукописи



Нуртдинова Лариса Альвертовна

**Лазерная генерация на кристаллах
 $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4\text{:RE}$ (RE=Ce, Yb; $x=0..1$) с применением принципов
управления фотодинамическими процессами**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань – 2015

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель:

Тагиров Мурат Салихович, доктор физико-математических наук, профессор,
зав. кафедрой квантовой электроники и радиоспектроскопии Института физики
КФУ

Официальные оппоненты:

Наумов Андрей Витальевич, доктор физико-математических наук, доцент по
специальности "Оптика", Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Троицк,
зав. Отделом молекулярной спектроскопии, зам. директора по научной работе.

Лобков Владимир Сергеевич, кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Казанский
физико-технический институт им. Е.К.Завойского Казанского научного центра
Российской академии наук (КФТИ КазНЦ РАН), г. Казань, заведующий
Лабораторией быстропротекающих молекулярных процессов.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск

Защита состоится 15 октября 2015 г. в 15 час. 20 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.081.07 при ФГАОУВПО «Казанский
(Приволжский) федеральный университет» по адресу: 420008, г. Казань,
ул. Кремлевская, д. 16а, ауд. 112 Института физики.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке имени Н.И. Лобачевского
Казанского (Приволжского) федерального университета (г.Казань,
ул. Кремлевская, д. 35). Электронная версия размещена на официальных сайтах
ВАК при Министерстве образования и науки РФ (vak2.ed.gov.ru) и Казанского
(Приволжского) федерального университета krfu.ru.

Автореферат разослан _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета:
д.ф.-м.н., профессор

Камалова Д. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Ультрафиолетовые (УФ) лазеры сегодня являются важным инструментом во многих областях науки и техники. Наиболее востребованные применения включают мониторинг окружающей среды (в составе лидаров [1,2]), диагностика процессов горения в двигателях внутреннего сгорания [3], производство полупроводниковых приборов [4], прецизионная обработка материалов [5], оптическая связь [6], фотолитография [7], а также в медицина (в дерматологии [8], косметологии [9,10], глазной хирургии [11]) и биология [12]. Преимуществами твердотельных перестраиваемых лазеров, способных напрямую генерировать УФ излучение, перед коммерчески доступными параметрическими генераторами или другими источниками, использующими нелинейные преобразователи длины волны лазерного излучения, является их простота, надежность, долговечность и возможность наращивать выходную мощность за счет дополнительных каскадов усиления при сохранении небольших габаритов.

Поиск активных сред УФ диапазона спектра на основе оптических переходов примесных ионов в настоящее время ограничивается фторидными кристаллами (широкая запрещенная зона), активированными редкоземельными ионами, в частности, трехвалентного церия (наиболее простая схема уровней). Лазеры на основе церий-активированных фторидных кристаллов генерируют излучение с перестройкой длины волны в области 280–340 нм. Однако уже первые попытки получения лазерной генерации в таких средах показали, что в поле интенсивного излучения накачки и лазерной генерации в них индуцируются различные фотодинамические процессы (ФДП), такие как поглощение из возбужденных состояний (ПВС) ионов примеси, фотоионизация примесных центров, образование и деструкция центров окраски (ЦО) и так далее. Эти процессы являются основным источником потерь лазерной генерации, и сама возможность получения лазерной генерации зависит от соотношения вероятностей этих процессов по отношению к сечению усилению света в активной среде. С этой точки зрения понимание как протекают эти процессы, как происходит обмен энергией между локализованными уровнями редкоземельных ионов (РЗИ) и объединенными в энергетические зоны уровнями катионов кристаллической решетки и поиск способов как избежать или снизить связанные с ними потери, или даже использовать их во благо, является **актуальной** задачей.

Ранее был предложен кристаллохимический подход [13] повышения стабильности оптических свойств активных сред по отношению к УФ излучению накачки, суть которого заключается в организации дополнительных каналов рекомбинации для фотоиндуцированных свободных носителей заряда, конкурирующих с их захватом дефектами кристаллической решетки (образованием ЦО), при вариации их химического состава (например, соактивация ионами Yb и Lu[14]). Кроме того известно, что динамическое равновесие процессов образования и разрушения ЦО можно смещать в ту или иную сторону за счет подбора внешних условий. Так, был обнаружен максимум дифференциального КПД лазерной генерации на кристалле $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ при температуре активной среды 273 К, что соответствовало такому распределению населенностей на состояниях ЦО, при котором поглощение в области длин волн лазерной генерации оказывалось минимальным [15]. Также было продемонстрировано улучшение энергетических характеристик лазера на основе кристалла $\text{LiSAF}:\text{Ce}^{3+}$ при дополнительном облучении активной среды излучением с длиной волны 532 нм [16], в результате которого ЦО разрушались, уменьшая потери в канале лазерной генерации. Таким образом, использование комбинации кристаллохимического и физического подходов представляется весьма **перспективным** при создании новых активных сред лазеров УФ диапазона, а также позволит расширить и углубить объем фундаментального научного знания в этой области.

Целью диссертационной работы являлось создание новой эффективной твердотельной активной среды для квантовой электроники УФ диапазона спектра на основе фторидных кристаллических материалов со структурой шеелита, активированных ионами Ce^{3+} , с применением принципов управления фотоиндуцированными процессами в этих активных средах.

Научная новизна работы

1. Впервые **проведены комплексные исследования** ФДП в кристаллах $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Yb}^{3+}$ ($\text{LYLF}:\text{Ce},\text{Yb}$) методами оптической, лазерной спектроскопии и фотопроводимости; **определены** спектральные характеристики и величины основных параметров фотодинамических процессов в этих средах; **установлена** природа перехода из возбужденного состояния ионов Ce^{3+} ; **определено** положение основного состояния ионов Ce^{3+} относительно дна зоны проводимости в кристаллах состава $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ ($x = 0..1$); построена наиболее полная на сегодняшний день модель ФДП в этих активных средах.

2. Впервые **выявлен** оптимальный химический состав лазерной среды и установлены оптимальные условия получения лазерной генерации для активной среды $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$).

3. Впервые **проведены** эксперименты по исследованию влияния на лазерные характеристики активной среды $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$) частоты следования импульсов накачки, химического состава образцов, температуры активного элемента и применения дополнительной подкачки активного элемента излучением с длиной волны, обесцвечивающей и наводящей ЦО в активной среде; **установлена** возможность управления эффективностью лазерной генерации при использовании внешних воздействий (температура, подсветка, химический состав активного элемента) за счет смещения равновесия между различными фотодинамическими процессами в активной среде.

Практическая ценность работы

Установлен оптимальный диапазон концентраций ионов $\text{Y}^{3+}/\text{Lu}^{3+}$, а также установлены оптимальные условия накачки (с понижением температуры и использованием дополнительной подсветки активного элемента лазерным излучением на длине волны 532 нм) в активной среде $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$), при которых реализуются максимальные для данной активной среды дифференциальный КПД лазерной генерации и ширина полосы перестройки лазерного излучения. Разработанный комплексный подход исследования фотодинамических процессов, сочетающий методы оптической, лазерной спектроскопии и фотопроводимости, позволяет построить наиболее полную на сегодняшний день модель фотодинамических процессов в активной среде, оценить ее перспективность и установить оптимальные условия ее возбуждения. Подтверждены и продемонстрированы возможности использования фотофизической техники для управления фотодинамическими процессами в активных средах, которые могут быть применены в различных устройствах квантовой электроники (лазерный элемент, оптический затвор, насыщающийся поглотитель и т.д.)

Защищаемые положения:

1. Фотопроводимость, возникающая в кристаллах фторидов со структурой шеелита LYLF , активированных ионами Ce^{3+} , в диапазоне длин волн 240-300 нм с максимумом вблизи 270 нм, обусловлена процессами ПВС в результате 5d-6s переходов ионов Ce^{3+} .

2. Оптимальными условиями возбуждения лазерной генерации на 5d-4f переходах ионов Ce^{3+} в кристаллах фторидов со структурой шеелита состава

LYLF являются π -поляризованное излучение накачки с длиной волны > 290 нм, что соответствует наименьшей вероятности фотоионизации ионов Ce^{3+} .

3. Кристалл $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{Ce},\text{Yb}$ ($x=0.5-0.3$, концентрация ионов Ce^{3+} 0.3–1%) является эффективной активной средой лазера УФ диапазона спектра на основе 5d-4f переходов ионов Ce^{3+} .

4. При изменении температуры активного элемента и применении дополнительной подсветки лазерным излучением в полосы поглощения из возбужденного состояния ионов Ce^{3+} либо в полосы поглощения ЦО обратимым образом изменяется дифференциальный КПД и диапазон перестройки лазерной генерации за счет смещения равновесия процессов образования и разрушения ЦО.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы лично докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: XI, XVI и XVII всероссийская молодежная научная школа “Когерентная оптика и оптическая спектроскопия”(Казань 2006, 2008 и 2013); International Conference on Excited States of Transition Elements (ESTE 2010), Wroclaw & Piechowice, Poland 4 - 9 September 2010; 11th Europhysical Conference on Defects in Insulating Materials (EURODIM 2010), Pecs, Hungary 2-16 July, 2010; XV International Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare-earth and transition metal ions, Kazan, Russia, Sep. 16-20, 2013; 18th International Conference on Dynamical Processes in Excited States of Solids (DPC'13), Fuzhou, China, August 4-9, 2013; 17th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL2014), Wroclaw, Poland, 13-18 July, 2014.

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в девяти статьях в рецензируемых научных журналах [A1-A9]. Из них семь публикации в международных журналах [A1,A3-A6,A8,A9], одна публикация в российском журнале [A2], входящем в перечень научных изданий ВАК, и одна публикация в международном электронном журнале [A7]. Результаты работы также отражены в тезисах конференций [A10-A26].

Личный вклад автора

Представленные в данной диссертации экспериментальные данные были получены в НИЛ МРС и КЭ им. С.А. Альтшулера Института физики Казанского (Приволжского) федерального университета. Непосредственно автором проведены все экспериментальные работы, за исключением регистрации спектров возбуждения и кинетик люминесценции образцов при синхротронном возбуждении, написаны компьютерные программы для проведения численных

расчетов и моделирования ФДП в исследуемых активных средах, проведены расчеты, анализ экспериментальных данных, написаны статьи. Автор принимал активное участие в постановке целей и задач, планировании экспериментов, подготовке образцов для исследований.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка публикаций автора и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 192 страницы, включая 67 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 190 наименований.

В **первой главе** приведен обзор работ по фотодинамическим процессам и лазерной генерации в церий-активированных УФ активных средах, использованных при интерпретации полученных автором экспериментальных данных. Обзор состоит из пяти подразделов, обобщающих объем знаний, накопленных при исследовании процессов поглощения из возбужденных состояний и фотоионизации примесных центров в Се-активированных активных средах, спектральных характеристик центров окраски различных типов в кристаллах LiYF_4 (LYF) и LiLuF_4 (LLF), активированных ионами Ce^{3+} , лазерной генерации и ее параметров, полученных на этих активных средах, а также о ширине запрещенной зоны в кристаллах двойных фторидов структуры шеелита и существующих моделях фотодинамических процессов, индуцируемых в активных средах УФ диапазона спектра в условиях интенсивной накачки.

Во **второй главе** излагаются результаты спектрально-кинетических исследований исследуемых объектов.

Кристаллы $\text{LYLF}:\text{Ce},\text{Yb}$ были выращены методом Бриджмена-Стокбаргера в НИЛ МРС и КЭ им. С.А. Альтшулера Института физики С.Л. Кораблевой. После ориентирования монокристаллов с помощью поляризационного микроскопа им была придана форма плоских дисков с толщиной порядка 0.5-2 мм с полированными поверхностями, причем оптическая ось кристалла располагалась в плоскости дисков. Были зарегистрированы спектры поглощения, люминесценции и возбуждения люминесценции образцов в УФ области спектра. Было установлено, что с увеличением концентрации ионов Y^{3+} в исходных компонентах шихты пики полос поглощения вблизи 295 и 245 нм, соответствующие 4f-5d переходам ионов Ce^{3+} , а также оба пика люминесценции монотонно смещаются в коротковолновую область, в то время как пики полос поглощения вблизи 205, 195 и 185 нм – в длинноволновую. Такое смещение обусловлено увеличением

расталкивания 5d подуровней с ростом кристаллического поля при уменьшении постоянной решетки, связанного в свою очередь с заменой одних катионов решетки на другие с меньшим ионным радиусом.

Анализ зарегистрированных спектров возбуждения люминесценции под воздействием синхротронного возбуждения в диапазоне энергий 4-19 эВ показал наличие корреляций со спектральными распределениями параметров трехэкспоненциальной функции (1), аппроксимирующей кинетики люминесценции в соответствующем диапазоне возбуждений.

$$I(t) = I_{\text{piled-up}} + \sum_i I_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right), \quad (1)$$

где I_i и τ_i – амплитуда и постоянная времени соответствующей компоненты в кинетике люминесценции, $I_{\text{pile-up}}$ – уровень накопления, который несет информацию о вкладе в кинетику долгой люминесценции со временем жизни >100 нс, распад которой не удастся прописать в кинетике из-за ограничений, связанных с режимом работы синхротрона. Было установлено, что возбуждение с энергией кванта 4–9 эВ приводит к фотоионизации ионов Ce^{3+} в результате внутрицентровых переходов с нижнего возбужденного 5d состояния на подуровни, расположенные в зоне проводимости кристалла. При более высокоэнергетичном возбуждении передача энергии на ионы трехвалентного церия происходит, в основном, от экситонов различного типа, связанных с электронными переходами с уровней ионов фтора, образующих валентную зону, на уровни ионов Lu, Y и Li, образующие зону проводимости. В Lu-содержащих материалах с экситонными механизмами передачи возбуждения конкурирует канал передачи от возбужденных ионов Lu^{3+} , переводимых в возбужденное состояние в результате внутрицентровых 4f-5d и 4f-6s переходов самих ионов Lu^{3+} .

Третья глава посвящена измерениям фотопроводимости в кристаллах LYLF:Ce,Yb , а также результатам расчетов параметров ФДП. Измерения фотопроводимости проводились при помощи двух зарекомендовавших себя методик – с накладными электродами [17] и микроволновой [18] при одно- и двухступенчатом возбуждении лазерными импульсами в диапазоне длин волн 225-330 нм. Спектры фотопроводимости, зарегистрированные при одноступенчатом возбуждении представлены на рисунке 1. Видно, что порог фотопроводимости приходится на длину волны 300 нм, а главной особенностью спектра является полоса с максимумом вблизи 260-270 нм.

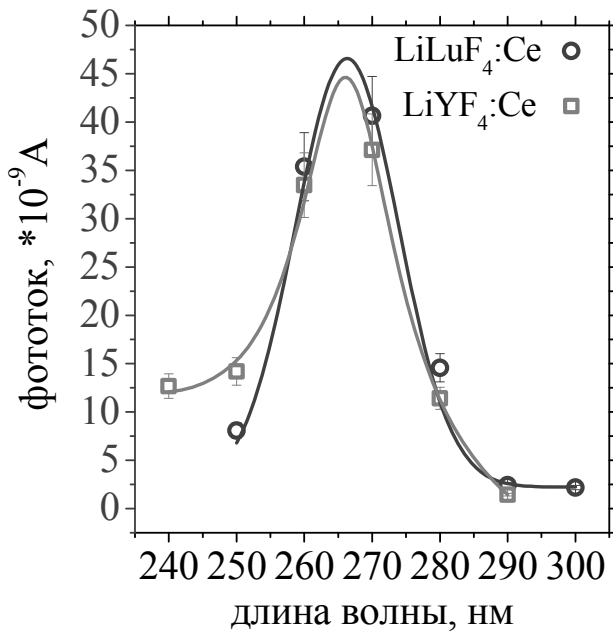


Рисунок 1а. Спектры фотопроводимости в кристаллах LiYF_4 и LiLuF_4 , номинально чистых и активированных ионами Ce^{3+} , зарегистрированные при помощи традиционной методики.

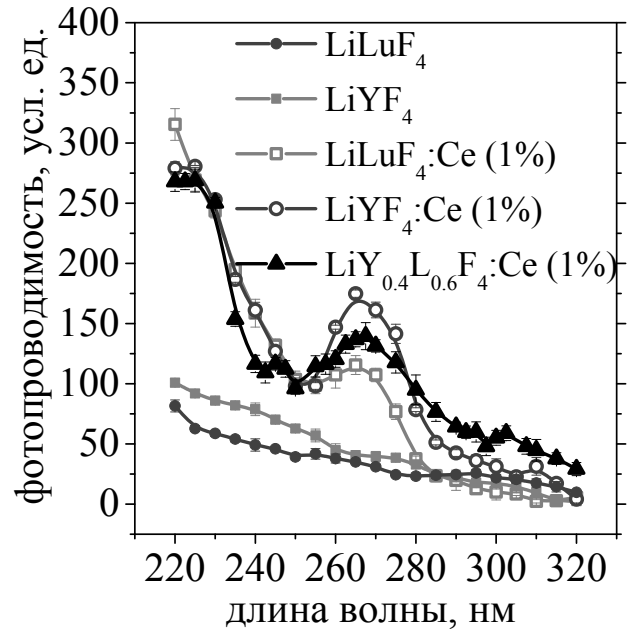


Рисунок 1б. Спектры фотопроводимости в кристаллах $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4$ ($x=0, 0.4, 1$), номинально чистых и активированных ионами Ce^{3+} , зарегистрированные при помощи микроволновой методики.

Чтобы установить природу этой полосы были зарегистрированы энергетические зависимости сигнала фотопроводимости при помощи обеих методик. Видно (см. рисунок 2), что характер этой зависимости от длины волны возбуждения меняется от квадратичный при наиболее длинноволновом возбуждении до линейной и сублинейной при укорочении длины волны. На основе четырехуровневой модели (см. рисунок 3) и соответствующей ей системы дифференциальных кинетических уравнений (2) на населенности этих уровней была проведена аппроксимация энергетических зависимостей фотопроводимости для стационарного (данные традиционной методики) и динамического (данные микроволновой методики) режима.

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_1}{dt} &= -U(t, \lambda) \cdot \sigma_{gsa}(\lambda) \cdot n_1 + \frac{1}{\tau} \cdot n_2 - U(t, \lambda) \cdot \sigma_{dir}(\lambda) \cdot n_1 \\
 \frac{dn_2}{dt} &= U(t, \lambda) \cdot \sigma_{gsa}(\lambda) \cdot n_1 - \frac{1}{\tau} \cdot n_2 - U(t, \lambda) \cdot \sigma_{ion}(\lambda) \cdot n_2 + \sigma_{rec} \cdot v \cdot (n_3 + n_4) \cdot n_3 \\
 \frac{dn_3}{dt} &= U(t, \lambda) \cdot \sigma_{ion}(\lambda) \cdot n_2 + U(t, \lambda) \cdot \sigma_{dir}(\lambda) \cdot n_1 + \frac{1}{\tau_C} \cdot n_4 + \\
 &+ U(t, \lambda) \cdot \sigma_C(\lambda) \cdot n_4 - \left[\sigma_{rec} \cdot v \cdot (n_3 + n_4) + \sigma_{trap} \cdot v \cdot (n_C - n_4) \right] \cdot n_3
 \end{aligned} \quad , \quad (2)$$

$$\frac{dn_4}{dt} = \sigma_{trap} \cdot v \cdot (n_C - n_4) \cdot n_3 - \frac{1}{\tau_C} \cdot n_4 - U(t, \lambda) \cdot \sigma_C(\lambda) \cdot n_4$$

$$N = n_1 + n_2 + n_3 + n_4$$

где 1, 2 – основное и возбужденное состояния ионов Ce^{3+} , 3 – зона проводимости кристалла, 4 – состояния ловушек; n_1, n_2, n_3, n_4 – населенности состояний 1,2,3,4; $U(t, \lambda)$ – плотность потока фотонов возбуждающего излучения на длине волны λ ; τ – радиационное время жизни нижнего 5d-состояния ионов Ce^{3+} ; $\sigma_{gsa}(\lambda)$ – сечение ПОС ионов Ce^{3+} ; $\sigma_{ion}(\lambda)$ – сечение ПВС (сечение двухступенчатой ионизации) ионов Ce^{3+} ; $\sigma_{dir}(\lambda)$ – Ce^{3+} сечение одноступенчатой ионизации ионов Ce^{3+} ; $\sigma_C(\lambda)$ – сечение поглощения центров окраски; $\sigma_{rec}, \sigma_{trap}$ – сечения рекомбинации и захвата ловушками свободных носителей заряда; v – скорость свободных электронов в зоне проводимости; τ_C – среднее время жизни ЦО при комнатной температуре; n_C – концентрация ловушек; N – концентрация примесных ионов в активной среде.

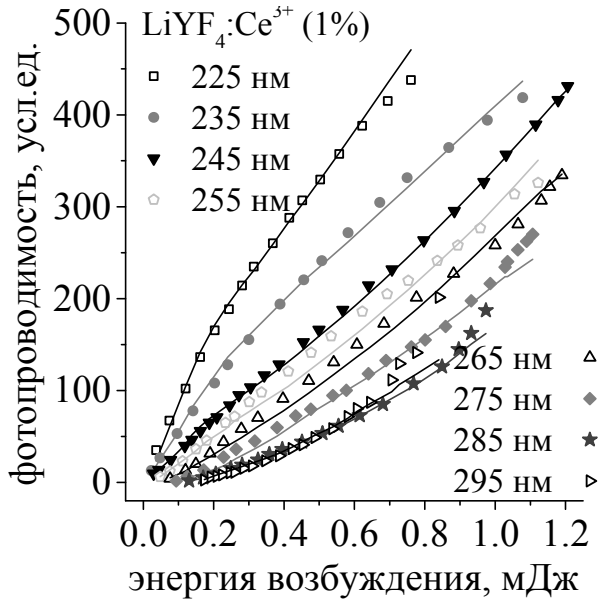


Рисунок 2. Энергетические зависимости фотопроводимости при возбуждении в диапазоне длин волн 225-295 нм. Линиями обозначены результаты аппроксимации

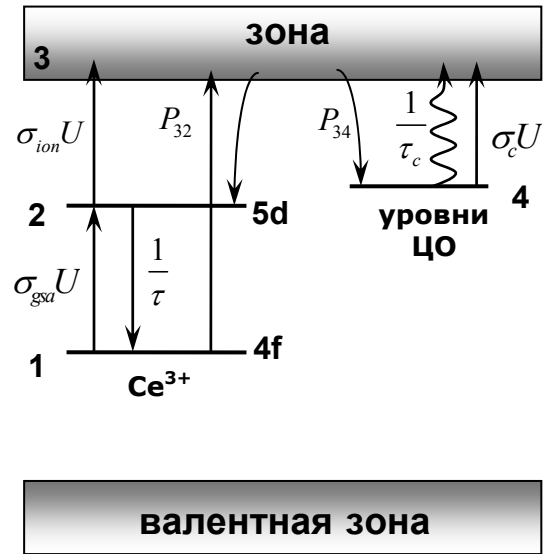


Рисунок 3. Четырехуровневая модель фотодинамических процессов

Для этого в первом случае из системы (2) была выведена аналитическая функция на населенность n_3 уровня, заменяющего зону проводимости, а во втором случае – в результате численного решения и вариации постоянных системы (2) добивались наименьшего значения целевой функции с применением метода градиентного спуска. При этом, поскольку часть параметров зависела, а часть – не зависела от длины волны возбуждения,

одновременно решение системы и процедура оптимизации полученных решений относительно экспериментальных данных производились для всех семи наборов данных, соответствующих разным длинам волн возбуждающего излучения. В результате проделанных расчетов были получены значения и спектральные распределения ключевых параметров, характеризующих ФДП в исследуемых активных средах (см. рисунок 4, [A3]). Сечение рекомбинации в LLF оказалось на 2 порядка выше, чем в LYF ($\sim 10^{-13}$ и 10^{-15} см^2 соответственно). Оказалось необходимым ввести в модель прямой переход из основного $4f$ состояния церия в зону проводимости, сечение такого перехода однако оказалось на 2-3 порядка меньше сечения ионизации Ce^{3+} из возбужденного состояния ($\sim 10^{-19}$ - 10^{-20} см^2), что может означать, что переход осуществляется в коротковолновый край полосы поглощения, как это было показано в работе [19].

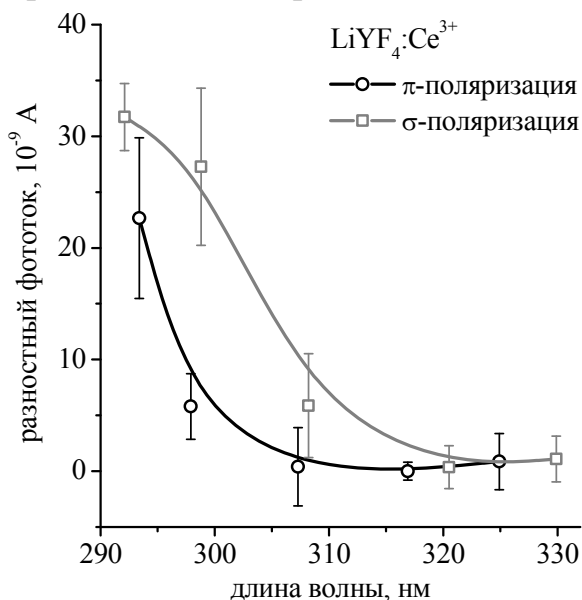


Рисунок 4а. Поляризованные спектры фотоионизации ионов Ce^{3+} в кристалле $\text{YLF}:\text{Ce}$ вблизи порога

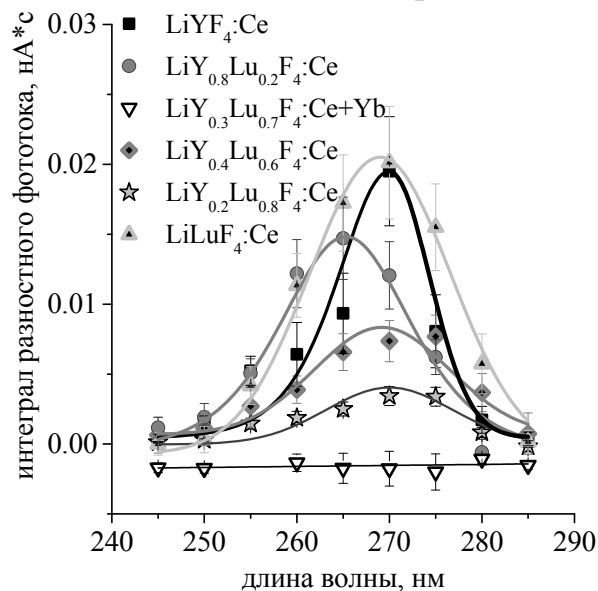


Рисунок 4б. π-поляризованные спектры фотоионизации ионов Ce^{3+} в диапазоне длин волн 245-285 нм (накачка – 300 нм)

Спектральное распределение сечения ионизации (см. рис. 4б) представляет собой полосу с максимумом вблизи 265 нм и полушириной на полувысоте ~ 20 нм. Поскольку спектр поглощения из основного состояния и спектр поглощения ЦО не имеет таких особенностей, разумно предположить, что полоса в спектрах фотопроводимости обусловлена процессами двухступенчатой фотоионизации ионов Ce^{3+} . Это предположение было подтверждено путем регистрации спектров фотопроводимости посредством традиционной методики при двухступенчатом возбуждении на длине волны 300 нм в канале поглощения из основного состояния и в диапазоне длин волн

240-300 нм в канале поглощения из возбужденного состояния ионов Ce^{3+} . Порог фотопроводимости (рис. 4а) оказался выше для π -поляризованного излучения зондирования (~ 300 нм). Сигнал фотопроводимости из возбужденных состояний примесных ионов также представляет собой полосу, идентичную полосам, в зарегистрированных спектрах фотопроводимости и рассчитанных спектрах фотоионизации трехвалентного церия. В образце, дополнительно соактивированном ионами Yb^{3+} , фотопроводимость из возбужденного состояния принимает отрицательные значения во всем диапазоне зондирования. Поскольку ионы Yb^{3+} не имеют полос поглощения в области 245-300 нм, наблюдаемый эффект может быть связан с возрастанием вероятности рекомбинационных процессов в образцах, связанных с присутствием ионов иттербия.

Положение максимума полосы ионизации из возбужденного состояния Ce^{3+} в спектре определяется взаимным расположением энергетических состояний примесных ионов относительно энергетических зон матрицы-основы. Поскольку положение полосы в полученных спектрах фотоионизации ионов Ce^{3+} с учетом кванта перехода из основного 4f на нижнее 5d состояние хорошо совпадает с положением полосы 4f-6s поглощения ионов Ce^{3+} (см. рис. 6), разумно предположить, что полоса в спектрах поглощения в кристаллах состава $\text{LYLF}:\text{Ce}$ с максимумом вблизи 265 нм также соответствует переходу на 6s состояния ионов Ce^{3+} . Квадратичная зависимость сигнала фотопроводимости от энергии возбуждения в диапазоне 275-305 нм говорит о том, что фотопроводимость в этом спектральном диапазоне связана с внутрицентровыми переходами ионов Ce^{3+} с 4f на высоколежащие и перекрывающиеся с зоной проводимости 6s-состояния в результате двухступенчатого процесса (через нижнее 5d состояние). Поскольку вклад долгоживущей компоненты в кинетику люминесценции ионов Ce^{3+} при возбуждении в полосы поглощения на все вышележащие 5d состояния незначителен, а лазерная генерация была получена при накачке на длине волны вблизи 240 нм, верхние 5d-состояния ионов Ce^{3+} , по всей видимости расположены ниже дна зоны проводимости кристалла. Нарастание долгоживущей составляющей начинается с энергий возбуждения ~ 7.2 эВ, что по-видимому связано с прямой фотоионизацией ионов Ce^{3+} в зону проводимости. При ширине запрещенной зоны в кристалле LYF ~ 11.5 -12 эВ это означает, что 4f состояние Ce^{3+} расположено на ~ 4.5 эВ выше валентной зоны. Это согласуется с результатами Тиля [20], который из результатов XPS исследований установил, что основное состояние ионов Tb^{3+} в кристалле LYF

находится выше на 2.9 эВ над валентной зоной, следовательно, согласно правилу Доренбоса [21], для ионов Ce^{3+} эта величина составляет 4.4 эВ.

Таким образом, измерения фотопроводимости были успешно применены для исследования ФДП в кристаллах $\text{LYLF}:\text{Ce}^{3+}$ в диапазоне длин волн возбуждения 225 – 320 нм.

В **четвертой главе** приведены результаты лазерных экспериментов в активной среде $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$) в схемах с продольной и поперечной накачкой в плоском резонаторе Фабри-Перо в селективной и неселективной геометрии при импульсном лазерном возбуждении (длительность импульса 10 нс, частота следования 10 Гц). Была проведена оптимизация по коэффициенту отражения выходного зеркала резонатора, который в селективной и неселективной схеме составил 25% и 80% соответственно. Максимальный дифференциальный КПД лазерной генерации составил 22% в неселективной схеме. Перестройка длины волны лазерной генерации в диапазоне ~305-335 нм представляет собой две области (см рис. 5), соответствующие коротко- и длинноволновому крыльям контура усиления (вблизи 310 и 327 нм), разделенные спектральным диапазоном (~317-323 нм), где лазерная генерация не наблюдается, несмотря на непрерывно положительный коэффициент усиления во всей области [A8]. В смешанном кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Ce}$ в отличие от $\text{LLF}:\text{Ce}$ и образцов, соактивированных ионами Yb^{3+} , лазерную генерацию в длинноволновом крыле контура усиления получить не удалось.

Были исследованы характеристики лазерной генерации при возбуждении на длинах волн 300 и 290 нм. В первом случае дифференциальный КПД генерации не меняется во всем диапазоне энергий накачки как вблизи коротковолнового максимума контура усиления, так и вблизи длинноволнового. При накачке на длине волны 290 нм в длинноволновом крыле перестроечной характеристики наблюдается провал (см. рис. 5). При этом дифференциальный КПД генерации на длине волны 310 нм изменяет значение при достижении некоторого уровня энергии накачки, а на 327 нм – испытывает насыщение и демонстрирует гистерезис при изменении энергии накачки вверх и вниз [A5], вероятно связанный с процессами накопления долгоживущих ЦО.

Перестроечные характеристики π - и σ -поляризованных компонент излучения лазерной генерации при накачке на длине волны 300 нм демонстрируют, что в длинноволновом крыле контура усиления среды преобладает σ -поляризованное излучение (см. рис. 6), хотя геометрия

резонатора создает благоприятные условия для развития исключительно π -поляризованной генерации. Лимом и Гамильтоном было установлено, что долгоживущие ЦО в кристаллах LYF с церием имеют полосы поглощения с максимумом вблизи 340 нм, наиболее интенсивные для π -поляризованного излучения. То есть эти центры эффективно поглощают π -поляризованное излучение ионов церия в этой области.

Таким образом, принимая во внимание ранее полученные данные о спектре фотоионизации из возбужденных состояний ионов Ce^{3+} в исследуемых средах, можно утверждать, что с точки зрения получения лазерной генерации на кристаллах $\text{LYLF}:\text{Ce}$ представляется разумным с целью снижения эффективности ФДП выбирать излучение накачки на длинах волн >290 нм, где вероятность фотоионизации ионов Ce^{3+} минимальна.

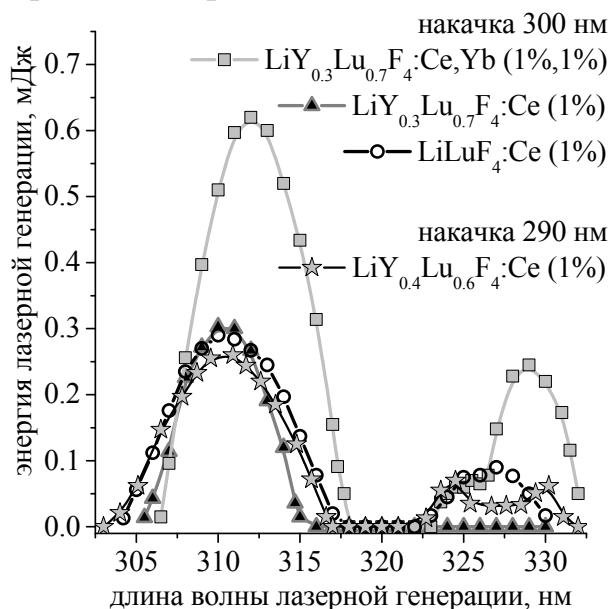


Рисунок 5. Перестройка длины волны лазерной генерации в кристаллах $\text{LYLF}:\text{Ce},\text{Yb}$

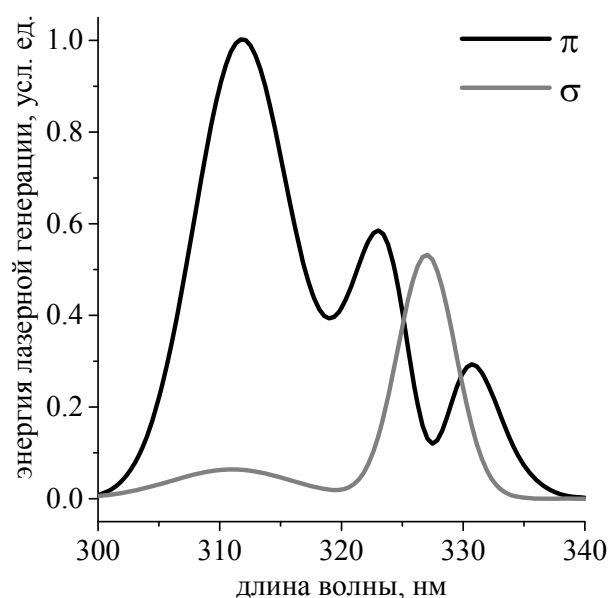


Рисунок 6. π и σ -поляризованные компоненты перестраиваемой лазерной генерации, зарегистрированные в кристалле $\text{LLF}:\text{Ce}$ (0.1 ат.%)

Далее были проведены эксперименты по получению лазерной генерации в исследуемых объектах при охлаждении активного элемента до температур ниже 0°C . Видно (см. рис. 7), что при охлаждении активного элемента повышается энергия, дифференциальный КПД лазерной генерации, расширяется диапазон перестройки длины волны. В образце смешанного кристалла, несоактивированного ионами Yb^{3+} появляется лазерная генерация в длинноволновом крыле контура усиления. Такая зависимость лазерных характеристик от изменения температуры активного элемента может быть обусловлена сужением колебательно-уширенных спектров фотоионизации или

поглощения ЦО, либо снижением эффективности термализации из возбужденных состояний примеси, расположенных вблизи дна зоны проводимости кристалла [22].

Наконец, были проведены эксперименты по исследованию влияния на характеристики лазерной генерации частоты следования импульсов накачки и дополнительной подсветки активного элемента. Уменьшение частоты следования импульсов накачки в 100 раз не привело к существенному изменению дифференциального КПД лазерной генерации, а значит имеющиеся в системе долгоживущие ЦО не успевают разрушиться за период между двумя импульсами накачки.

Подсветка лазерного элемента дополнительным лазерным излучением производилась на длине волны 532, 340 и 266 нм с плотностью энергии, сравнимой с плотностью энергии накачки на длине волны 300 нм. Выбор длин волн подсветки обусловлен спектрами поглощения различных типов центров окраски, наблюдавшихся в кристаллах YLF и LLF, а также спектром фотоионизации ионов церия. Излучение подсветки генерировалось при помощи того же лазера, который участвовал в организации канала накачки, что позволило избежать проблем с синхронизацией различных источников излучения.

Как энергия, так и дифференциальный КПД лазерной генерации сильно уменьшаются при включении подсветки на длине волны 266 нм. В смешанном кристалле, несоактивированном ионами Yb, лазерная генерация подавляется полностью. Длина волны 266 нм попадает вблизи максимума полосы двухступенчатой фотоионизации ионов Ce^{3+} , а также в полосу поглощения V_k центров. Анализ зависимости коэффициента поглощения 266-нм излучения в накачиваемом объеме образца от энергии накачки на длине волны 300 нм позволил установить, что излучение подсветки поглощается в основном в канале поглощения из возбужденных состояний ионов Ce^{3+} .

Чтобы сместить динамическое равновесие в активной среде в сторону усиления процессов обесцвечивания наведенных УФ излучением короткоживущих ЦО, использовалась подсветка активного элемента на длинах волн 340 нм и 532 нм. При включении подсветки на длине волны 532 нм как энергия, так и диф. КПД лазерной генерации существенно возрастает (см. рис. 7) при дополнительном облучении лазерного элемента 532-нм излучением, а диапазон перестройки длины волны становится непрерывным на протяжении всего контура усиления (см. рис. 8).

Подкачка на длине волны 340 нм, вопреки ожиданиям, привела не к улучшению, а к ухудшению энергетического выхода генерации, хотя

предполагалось, что применение дополнительной подсветки приведет к разрушению F-центров и возвращению захваченных ими носителей в канал генерации. Однако при включении подсветки активных элементов энергия лазерной генерации в коротковолновом крыле перестроечной характеристики уменьшалась, а в длинноволновом – была полностью подавлена. Поскольку у трехвалентных ионов церия нет полос поглощения в этой области, разумно предположить, что наблюдаемый эффект связан с поглощением ЦО.

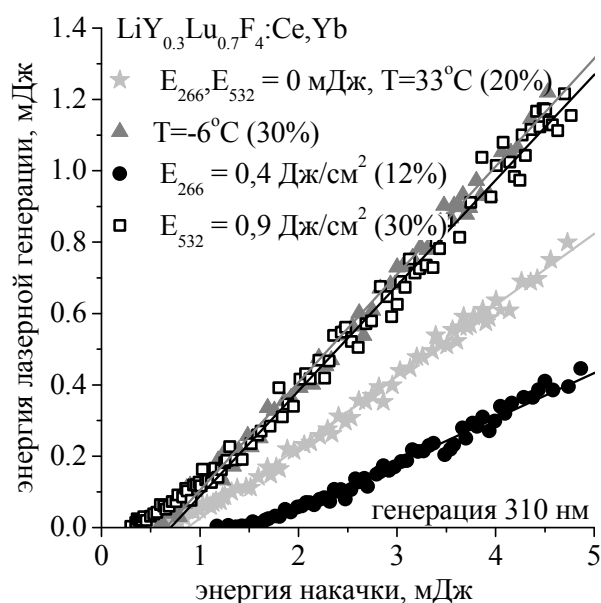


Рисунок 7. Дифференциальный КПД генерации на длине волны 310 нм в кристалле $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Ce},\text{Yb}$ (концентрация примеси 1 ат.%) для различных условий генерации

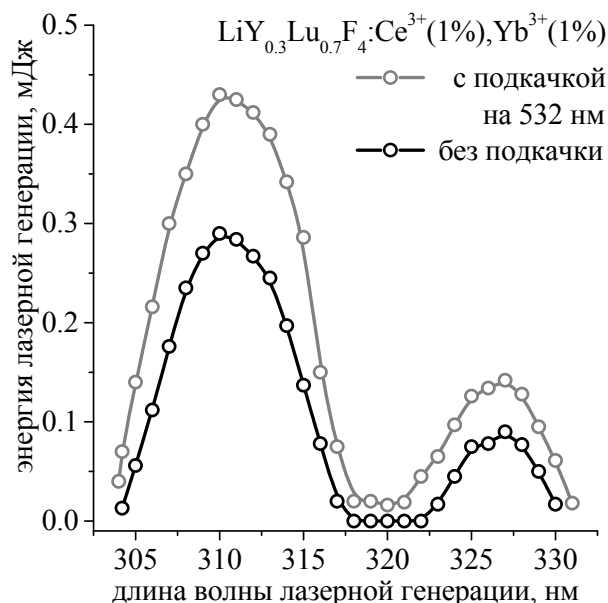


Рисунок 8. Перестроечная характеристика лазерной генерации без подсветки и при включении подсветки активного элемента на длине волны 532 нм

Долгоживущие F-центры, основные состояния которых, согласно [19], являются наиболее глубокозалегающими в зоне проводимости, поглощают излучение подсветки на длине волны 340 нм, переходят в возбужденное состояние, но не разрушаются. То есть захваченные ими фотоэлектроны не могут вернуться в канал генерации. Однако они оказываются не более чем на 3000 см^{-1} ниже дна зоны проводимости, а значит, могут быть безызлучательно переданы на менее глубоко залегающие уровни центров окраски других типов с энергией активации в 4200 и 4500 см^{-1} и временами жизни в микро-, милли- и секундном диапазонах, идентифицированные в работе [19]. Эти короткоживущие центры, по-видимому, гораздо более эффективно поглощают генерируемое лазерное излучение (см. модель в работе [A9]).

Таким образом, основные динамические потери лазерной генерации обусловлены, по всей видимости, короткоживущими ЦО, влиять на которые,

как было показано, оказалось возможным, создавая помехи для их образования (снижение эффективности процессов ПВС при помощи понижения температуры активного элемента), либо эффективно обесцвечивая их, пока длится импульс накачки (подсветка излучением на 532 нм, 340 и 266 нм), смещая баланс между процессами генерации и центрообразования в ту или иную сторону. Долгоживущие ЦО обуславливают лишь начальное снижение энергии лазерной генерации на ~30%. Наилучшие лазерные характеристики продемонстрировала активная среда LLF:Ce. Однако смешанные кристаллы LYLf:Ce,Yb ($x=0..0.5$) демонстрируют близкие значения дифференциального КПД генерации в УФ области спектра, а также схожие по ширине, но слегка отличающиеся по длинам волн диапазоны перестройки длины волны лазерной генерации. Лазерные характеристики всех исследуемых сред могут быть существенно улучшены при охлаждении активного элемента до температур < 0 °C, а также при подсветке активного элемента лазерным излучением на длине волны 532 нм с плотностью энергии того же уровня, что и в канале накачки.

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. **зарегистрированы** спектры поглощения, люминесценции, возбуждения люминесценции, фотопроводимости возбужденных кристаллов состава $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$);
2. **установлено**, что при облучении светом в диапазоне 4-19 эВ в кристаллах $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ индуцируются различные фотодинамические процессы, с последующим возвратом возбуждения на Ce^{3+} посредством передачи энергии от экситонов различной природы, причем в диапазоне энергий 9.7-11 эВ в Lu-содержащих материалах экситонные механизмы передачи энергии оказываются подавленными процессами передачи энергии через возбужденный ион Lu^{3+} ;
3. **установлены** значения ключевых параметров фотоиндуцированных процессов (сечение ионизации иона-активатора, вероятности захвата и рекомбинации носителей заряда, сечение поглощения ЦО);
4. **установлено**, что основное 4f-состояние ионов Ce^{3+} в кристаллах фторидов со структурой шеелита $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$) расположено на ~7.2 эВ ниже дна зоны проводимости;
5. **построена** наиболее полная на сегодняшний день модель фотодинамических процессов в исследуемых средах, определено положение основного 4f состояния относительно зоны проводимости кристалла;
6. **получена** лазерная генерация в УФ области спектра на кристаллах состава $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}$ ($\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$), проведена оптимизация по коэффициенту отражения выходного зеркала резонатора;

7. **исследованы** характеристики лазерной генерации (дифференциальный КПД, порог генерации, область перестройки длины волны) в зависимости от внешних воздействий (температура активного элемента, длина волны и мощность дополнительной подкачки лазерным излучением, частота следования импульсов накачки);

8. **разработаны** рекомендации по управлению фотоиндуцированными процессами в активных средах УФ диапазона на основе фторидных кристаллов со структурой шеелита, активированных ионами трехвалентного церия, которые заключаются в организации дополнительной подсветки активного элемента на длине волны 532 нм и понижения температуры активного элемента до температур порядка -20°C .

Основным результатом диссертационной работы является **создание** нового эффективного ($>35\%$) твердотельного непрерывно перестраиваемого (302-333 нм) УФ лазера на основе кристаллов состава $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}$ ($x = 0 \dots 0.5$; $\text{RE} = \text{Ce}, \text{Yb}$; концентрация ионов Ce 0.5..2 ат.%) при накачке импульсным излучением на длине волны 300 нм.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК:

A1. Нуртдинова, Л.А. Индуцированная фотопроводимость в широкозонных диэлектрических кристаллах LiMeF_4 ($\text{Me}=\text{Y}, \text{Lu}$), активированных ионами Ce^{3+} // Л.А.Нуртдинова, Я. Гюйо, А.С.Низамутдинов, А.К. Наумов, С.Л.Кораблева, В.В. Семашко. // Ученые записки КГУ – 2008. – Т.150. – кн. 2 – С.185-190.

A2. Нуртдинова, Л.А. Спектральные характеристики твердых растворов $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4$, активированных ионами Ce^{3+} / А.С. Низамутдинов, В.В.Семашко, А.К.Наумов, Л.А.Нуртдинова, Р.Ю.Абдулсабиров, С.Л.Кораблева, В.Н. Ефимов. // ФТТ. – 2008. – Т.50 – № 9. – С.1585-1588.

A3. Nurtdinova, L. Application of photoconductivity measurements to photodynamic processes investigation in $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$ and $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ crystals / L. Nurtdinova, V. Semashko, Y. Guyot, S. Korableva, M.-F. Joubert, A. Nizamutdinov. // Optical Materials – 2011. – Vol. 33. – P. 1530–1534.

A4. Nurtdinova, L. A. Characterization of Ce^{3+} and Yb^{3+} doped $\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ solid solutions as new UV active media / A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko, A. K. Naumov, S. L. Korableva, M. A. Marisov, V. N., Efimov, L. A. Nurtdinova. // Proc. of SPIE. – 2011. – 7994. – P. 79940H.

A5. Nurtdinova, L. A. New all-solid-state tunable UV Ce^{3+} , $\text{Yb}^{3+}:\text{LiY}_{0.4}\text{Lu}_{0.6}\text{F}_4$ laser / L.A. Nurtdinova, V.V. Semashko, O.R. Akhtyamov, S.L. Korableva, M.A. Marisov. // JETP Letters. – 2013. – Vol. 96 – № 10. – P. 633-635.

A6. Nurtdinova, L. A. Laser performance investigation of a new UV active media $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ and $\text{LiY}_{0.3}\text{Lu}_{0.7}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}+\text{Yb}^{3+}$ / E. K. Kuchaev, A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko, L. A. Nurtdinova, S. L. Korableva. // Journal of Physics Conference Series – 2013. – Vol. 461. – № 1. – P. 2029.

A7. Nurtdinova, L. Photodynamic processes and laser performance of Ce, Yb: $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4$ mixed crystals / Nurtdinova, L. , Semashko, V., Korableva, S., Nizamutdinov, A., Marisov, M. // Optics InfoBase Conference Papers. – 2013. – P. AM4A.24.

A8. Nurtdinova, L. A. Investigation of gain characteristics in mixed crystals LiMeF_4 (Me = Y, Lu, Yb) doped by Ce^{3+} ions / A. S. Nizamutdinov, L. A. Nurtdinova, V. V. Semashko, S. L. Korableva. // Optics and Spectroscopy – 2014. – Vol. 116. – № 5. – P. 732-738.

A9. Nurtdinova, L. A. Enhanced efficiency ultraviolet $\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4:\text{RE}^{3+}$ (RE = Ce, Yb) laser / L. A. Nurtdinova and S. L. Korableva. // Laser Physics Letters – 2014. – Vol. 11. – № 12. – P. 125807.

Тезисы докладов на научных конференциях:

A10. Nurtdinova, L. A. Pump Induced Photoconductivity in UV Solid-State Active Media Based On $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ and $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$ Single Crystals / L.A. Nurtdinova, A.S. Nizamutdinov, A.K. Naumov, R.Yu. Abdulsabirov, S.L. Korableva and V.V. Semashko // Book of abstracts of XII Conf. on Laser Optics, Laser Optics for Young Scientists (LOYS'2006), st.Peterburg, Russia, June 26-30, 2006. – st.Peterburg, 2006. – TuS2-03.

A11. Нуртдинова, Л.А. Исследования фотопроводимости кристаллов LiLuF_4 и LiYF_4 , активированных ионами Ce^{3+} / Нуртдинова Л.А., Низамутдинов А.С., Поливин А.Н., Семашко В.В., Наумов А.К., Абдулсабиров Р.Ю., Кораблева С.Л. // Сборник статей XI Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, 25-27 октября 2007. – Казань, 2007. – с. 250-253.

A12. Нуртдинова, Л.А. Исследование фотопроводимости фторидных кристаллов $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4$, активированных ионами Ce^{3+} / Л.А. Нуртдинова, В.В. Семашко, Я.Д. Гвийо, А.С. Низамутдинов, С.Л. Кораблева, А.К. Наумов, М.-Ф. Жубер. / Сборник трудов VI Международной конференции молодых ученых и специалистов Оптика-2009. - Санкт-Петербург, Россия, 19-23 октября 2009. - Санкт-Петербург, 2009. - С.342-344.

A13. Nurtdinova, L. A. Photodynamic Properties Investigation in $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$ crystal Using Photoconductivity Measurements / L. Nurtdinova, V. Semashko, Y. Guyot, S. Korableva, M.-F. Joubert // Тезисы докладов международной конференции ICONO/LAT 2010, Казань, Россия, 23-27 августа 2010. –Казань, 2010. – с. 52

A14. Nurtdinova, L. A. New UV tunable laser active media based on $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_4$ (Me = $\text{Y}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$) solid-solutions / A.S.Nizamutdinov, V.V.Semashko, A.K. Naumov, S.L.Korableva, M.A.Marisov, L.A.Nurtdinova, V.N.Efimov // Тезисы

докладов международной конференции ICONO/LAT 2010, Казань, Россия, 23-27 августа 2010. – Казань, 2010. – с. 54

A15. Nurtdinova, L. A. Photoconductivity measurements application to photodynamic processes investigations in Ce^{3+} -activated LiYF_4 and LiLuF_4 crystals L. Nurtdinova, V. Semashko, S. Korableva, Y. Guyot, M.-F. Joubert // Book of Abstracts of the 17th international conference on Solid Compounds of Transition Elements - SCTE 2010 Annecy, France, September 5-10, 2010. – Annecy, 2010. – с. 99.

A16. Nurtdinova, L. A. Solid-solutions $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Me}_x\text{F}_4$ ($\text{Me} = \text{Y}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$) as UV active media / A.Nizamutdinov, V.Semashko, A.Naumov, S.Korableva, M.Marisov, L.Nurtdinova, V.Efimov // Book of Abstracts of the International Conference on the Excited States of Transitions Elements (ESTE 2010), Wroclaw & Piechowice, 4-0 September. – Wroclaw, 2009. – P. Tu-3.

A17. Nurtdinova, L. Photoconductivity measurements application to photodynamic processes investigations in Ce^{3+} -activated LiYF_4 and LiLuF_4 crystals / L. Nurtdinova, V. Semashko, S. Korableva, Y. Guyot, M.-F. Joubert // Book of Abstracts of the International Conference on the Excited States of Transitions Elements (ESTE 2010), Wroclaw & Piechowice, 4-0 September. – Wroclaw, 2009. – P.Tu-4.

A18. Nurtdinova, L. Photoconductivity measurements in Ce^{3+} -doped fluorides / L. Nurtdinova, V. Semashko, Y. Guyot, S. Korableva, M.-F. Joubert // Abstracts and Program of XIV International Feofilov symposium on spectroscopy of crystals doped with rare earth and transition metal ions, St. Petersburg, Russia October 18-21, 2010.– St. Petersburg, 2010. – We-O-27.

A19. Nurtdinova, L. A. Energy transfer and relaxation dynamics in Ce^{3+} -doped $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4$ crystals by VUV spectroscopy / K. Ivanovskikh, A. Belsky, Y. Guyot, L. Nurtdinova, V. Semashko, M.-F. Joubert // In Book of Abstracts of 11th Europhysical Conference on Defects in insulating Materials (EURODIM 2010). – Pecs, 12-16 July 2010. – Hungary, 2010. – P. B82.

A20. Нуртдинова, Л.А. Исследование фотопроводимости фторидных кристаллов $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4$, активированных ионами Ce^{3+} / Э.К. Кучаев, А.С. Низамутдинов, В.В. Семашко, Л.А. Нуртдинова, С.Л. КорABLEVA / Сборник статей XVI Международной молодежной научной школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия», Казань, 17-19 сентября 2012. – Казань, 2012. – с. 69-73.

A21. Nurtdinova, L. A. New All-Solid-State Tunable UV $\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{LiY}_{0.4}\text{Lu}_{0.6}\text{F}_4$ laser / L.A.Nurtdinova, V.V. Semashko, S.L. Korableva // Conference Program of International conference on Coherent and Nonlinear Optics / Lasers, applications, and Technologies (ICONO/LAT) 2013. –Moscow, Russia, 18-22 June 2013. – Moscow, 2013. – P.71

A22. Nurtdinova, L. A. Photodynamic processes and laser performance of $\text{Ce}:\text{LiY}_x\text{Lu}_{1-x}\text{F}_4$ crystals L.A.Nurtdinova, V.V. Semashko, S.L. Korableva // In Book of Abstracts of 18th International conference on Dynamic Processes in Excited States of Solids 2013. – Fuzhou, China, 4-9 August 2013. – Fuzhou, 2013. – P.122.

A23. Nurtdinova, L. A. L.A.Nurtdinova, V.V. Semashko, S.L. Korableva. Photodynamic processes and laser performance of $\text{Ce}:\text{LiYLuF}_4$ // In Book of Abstracts of the XVth International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with

Rare Earth and Transition Metal Ions 2013. – Kazan, Russia, 16-20 September. – Kazan, 2013. – P. 74.

A24. Nurtidinova, L. A. Host cations contributions to VUV excitation spectrum of Ce^{3+} ions 5d-4f fluorescence in $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4$ crystals. L. A. Nurtidinova, K. Ivanovskikh, V. V. Semashko, M. F. Joubert, S. L. Korableva. // In Book of Abstracts of the XVth International Feofilov Symposium on Spectroscopy of Crystals Doped with Rare Earth and Transition Metal Ions 2013. – Kazan, Russia, 16-20 September. – Kazan, 2013. – P.121.

A25. Nurtidinova, L. Laser properties of the new $\text{Ce}^{3+}:\text{LiY}_{0.5}\text{Lu}_{0.5}\text{F}_4$ active medium / L. Nurtidinova, V. Semashko, S. Korableva // In Book of Abstracts of the 4th International Workshop on Advanced Spectroscopy and Optical Materials(IWASOM'13), Gdańsk, Poland, July 14-19, 2013. – Gdańsk, 2013. – P. 123.

A26. Nurtidinova, L. A. L. A. Nurtidinova, S. L. Korableva, M.A. Marisov. Efficient UV lasing in $\text{LiY}_{1-x}\text{Lu}_x\text{F}_4:\text{RE}$ (RE = Ce, Yb) monocrystals // In Book of Abstracts of the 17th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter 2014. – Wrocław, Poland, 2014. – P-220.

Цитированная литература

1. Ray, M. D. Ultraviolet mini-Raman lidar for stand-off, in situ identification of chemical surface contaminants / M. D. Ray, A. J. Sedlacek, and M. Wu // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71. – №9. – P. 3485-3489.

2. Alvarez II, R. J. Development and Application of a Compact, Tunable, Solid-State Airborne Ozone Lidar System for Boundary Layer Profiling / R. J. Alvarez II, C. J. Senff, A. O. Langford, A. M. Weickmann, D. C. Law, J. L. Machol, D. A. Merritt, R. D. Marchbanks, S. P. Sandberg, W. A. Brewer, R. M. Hardesty, and R. M. Banta // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2011. – Vol. 28. – №10. – P. 1258–1272.

3. Fajardo, C. Development of a high-speed UV particle image velocimetry technique and application for measurements in internal combustion engines / Fajardo, C., Sick, V. // Exper. in Fluids. – 2009. – Vol. 46. – №1. – P. 43-53.

4. Delmdahl, R. Large-Area Laser-Lift-Off Processing in Microelectronics / R. Delmdahl, R. Pätz, J. Brune // Phys. Proc. – 2013. – Vol. 41. – P. 241–248

5. Romoli, L. A study on UV laser drilling of PEEK reinforced with carbon fibers / L. Romoli, F. Fischer, R. Kling // Optics and Lasers in Engineering. – 2012. – Vol. 50. – P. 449–457

6. Herman, P.R Laser shaping of photonic materials: deep-ultraviolet and ultrafast lasers / P.R. Herman, R.S. Marjoribanks, A. Oetl, K. Chen, I. Kononov, S. Ness // Appl. Surf. Science. – 2000. – Vol. 154–155. – P. 577-586.

7. B. Paivanranta. Sub-10 nm patterning using EUV interference lithography / B. Paivanranta, A. Langner, E. Kirk, C. David, and Y. Ekinici // Nanotechnology. – 22. – 2011. – 375302.

8. Anderson, R.R. Lasers in dermatology - A critical update / R.R. Anderson // Journal of Dermatology. – 2000. – Vol. 27. – №11. – P. 700-705.

9. Situm, M. Benefits of controlled ultraviolet radiation in the treatment of dermatological diseases / Situm, M., Bulat, V., Majcen, K., Dzapo, A., Jezovita, J. // Collegium antropologicum. – 2014. – Vol. 38. – №4. – P. 1249-1253.

10. Gerber, W. Ultraviolet B 308-nm excimer laser treatment of psoriasis: a new phototherapeutic approach / Gerber W, Arheilger B, Ha TA, Hermann J, Ockenfels HM. // *Brit. J. of Dermat.* – 2003. – Vol. 149. – №6. – P. 1250-1258.
11. Schastak, S. Flexible UV light guiding system for intraocular laser microsurgery / Schastak, S., Yafai, Y., Yasukawa, T., Wang, Y.S., Hillrichs, G., Wiedemann, P. // *Lasers In Surgery And Medicine.* – 2007. – Vol. 39. – № 4. – P. 353-357.
12. Alifano, P. Results of UV laser application on biological material / P. Alifano, V. Nassisi, P. P. Pompa, A. Candido // *Proc. SPIE.* – 4762. – P.334-342.
13. Низамутдинов, А.С. Влияние катионов основы на спектрально-кинетические и лазерные характеристики кристаллов двойных фторидов со структурой шеелита, активированных ионами Ce^{3+} : дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Низамутдинов А.С. – Казань, 2007. – 139 с.
14. Laroche, M. Beneficial effect of Lu^{3+} and Yb^{3+} ions in UV laser materials / M. Laroche, S. Girard, R. Moncorge, M. Bettinelli, R. Abdulsabirov, V. Semashko // *Optical Materials.* – 2003. – Vol. 22. – P. 147–154.
15. Johnson, K.S. Efficient all-solid-state $Ce:LiLuF_4$ laser source at 309 nm / K.S. Johnson, H.M. Pask, M.J. Withford, D.W. Coutts // *Opt. Com.* – 2005. – Vol. 252. – P. 132–137.
16. Bayramian, A. J. $Ce:LiSrAlF_6$ laser performance with antisolarant pump beam / A. J. Bayramian, C. D. Marshall, J. H. Wu, J. A. Speth, S. A. Payne, G. J. Quarles, V. K. Castillo // *J. of Lum.* – 1996. – Vol. 69. – P. 85–94.
17. Happek, U. Electron transfer processes in rare earth doped insulators / U. Happek, S.A. Basun, J. Choi, J.K. Krebs, M. Raukas // *J. of Alloys and Compounds.* – 2000. – Vol. 303-304. – P. 198-206.
18. Joubert, M.-F. A new microwave resonant technique for studying rare earth photoionization thresholds in dielectric crystals under laser irradiation / M.-F. Joubert, S.A. Kazanskii, Y. Guyot, J.-C. Gacon, J.-Y. Rivoire, and C. Pedrini // *Phys. Rev. B.* – 2003. – Vol. 24. – P. 137-141.
19. Hamilton, D. S. Optical-absorption and photoionization measurements from the excited states of $Ce^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$ / D. S. Hamilton, S. K. Gayen, G. J. Pogatshnik, R. D. Ghen, and W. J. Miniscalco // *Phys. Rev. B* – 1989. – Vol. 39. – P. 8807–8815.
20. Thiel, C.W. Energies of rare-earth ion states relative to host bands in optical materials from electron photoemission spectroscopy: PhD thesis / C.W. Thiel. – Lyon, 2003, 380 p.
21. Rogers, E. Systematics in the optical and electronic properties of the binary lanthanide halide, chalcogenide and pnictide compounds: an overview / E. Rogers, P. Dorenbos and E. van der Kolk // *New Journal of Physics.* – 2011. – Vol. 13. – P. 093038.
22. Van der Kolk, E. Temperature dependent spectroscopic studies of the electron delocalization dynamics of excited Ce ions in the wide band gap insulator, Lu_2SiO_5 / E. van der Kolk, S. A. Basun, G. F. Imbusch, W. M. Yen // *Appl. Phys. Let.* – 2003. – Vol. 83. – № 9. – P. 1740-1742.