

На правах рукописи

Низамутдинов Алексей Сергеевич

Влияние катионов основы на спектрально-кинетические и лазерные характеристики кристаллов двойных фторидов со структурой шеелита, активированных ионами Ce^{3+}

Специальность: 01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Казань - 2007

Работа выполнена на кафедре квантовой электроники и радиоспектроскопии Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Семашко Вадим Владимирович,

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, заведующий отделом государственного института прикладной оптики, г. Казань, Андрианов Сергей Николаевич,

доктор технических наук, профессор Воронов Виктор Иванович

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского Казанского научного центра Российской Академии наук

Защита состоится «___» мая 2007 г. В _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.07 в Казанском государственном университете по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. Н.И.Лобачевского Казанского государственного университета

Автореферат разослан «___» апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сарандаев Евгений Владимирович

Актуальность работы.

Прогресс в области высоких технологий связан с использованием в технологических процессах лазерного излучения с все более короткими длинами волн. По этой причине разработка новых эффективных источников перестраиваемого по частоте лазерного излучения ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра является актуальной задачей.

Традиционно перестраиваемое по частоте когерентное излучение УФ диапазона спектра получают, используя технику нелинейного или параметрического преобразования частот лазеров других спектральных диапазонов [1]. При этом такие источники излучения оказываются чрезвычайно сложными с технической точки зрения, имеют высокую стоимость и крайне неудобны в эксплуатации. Альтернативой этому подходу является использование твердотельных материалов, способных усиливать излучение УФ диапазона спектра. На основе таких активных сред оказывается возможным сформировать требуемые характеристики лазерного излучения непосредственно в УФ диапазоне и создавать относительно простые и надежные источники УФ когерентного излучения.

Однако на сегодняшний день число известных кристаллических активных материалов УФ диапазона спектра не превышает десятка, а пригодными для практического применения являются лишь три активные среды: $\text{LiCaAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$, $\text{LiSrAlF}_6:\text{Ce}^{3+}$ и $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ [2]. Результаты настоящей работы расширяют круг твердотельных активных сред УФ диапазона.

Предпосылки создания твердотельных лазеров УФ диапазона спектра были заложены более 30 лет назад исследованиями Elias [3], и Yang и DeLuca [4]. Для получения вынужденного излучения УФ и вакуумного УФ диапазонов ими было предложено использовать межконфигурационные переходы трехвалентных редкоземельных ионов (РЗИ) в диэлектрических кристаллах с широкой запрещенной зоной. Однако практическая реализация лазерной генерации с использованием этих переходов оказалась сопряженной с рядом трудностей, возникающих при продвижении в коротковолновую часть видимого и УФ диапазонов. Было установлено, что при использовании для накачки активных сред интенсивного УФ излучения в них индуцируются различные динамические процессы, которые приводят к росту потерь и либо снижают эффективность

известных УФ твердотельных лазеров, либо полностью исключают даже самую возможность возбуждения УФ стимулированного излучения [2].

Выявление природы и специфики динамических процессов, возбуждаемых в активных средах УФ излучением, и разработка способов управления этими процессами оказываются крайне важными моментами при создании новых эффективных активных материалов УФ и вакуумно-ультрафиолетового диапазонов спектра.

Цель работы. Целью настоящей диссертации является исследование влияния катионного состава на спектрально-кинетические, фотохимические и лазерные характеристики смешанных кристаллов двойных фторидов со структурой шеелита, активированных ионами Ce^{3+} , и создание новых эффективных активных сред перестраиваемых лазеров УФ диапазона спектра.

Объекты исследования.

Объектами исследований диссертационной работы являлись смешанные кристаллы двойных фторидов со структурой шеелита, активированные ионами Ce^{3+} . Были исследованы две серии смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YF}_3$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YbF}_3$ с переменным соотношением концентраций ионов Y^{3+} , Lu^{3+} и Yb^{3+} .

Научная новизна.

Новизна настоящей диссертации состоит в том, что твердые растворы $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YF}_3$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YbF}_3$ были исследованы комплексно: было исследовано влияние химического состава на спектрально-кинетические, фотохимические и лазерные характеристики этих кристаллов.

В частности, новыми являются следующие результаты:

1. Впервые исследованы спектрально-кинетические характеристики твердых растворов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YF}_3$. Установлено, что люминесценция ионов церия в этих кристаллах частично носит рекомбинационный характер, и именно весом рекомбинационной компоненты в кинетике люминесценции объясняется вдвое больший квантовый выход люминесценции ионов Ce^{3+} в кристаллах LiLuF_4 по сравнению с кристаллами LiYF_4 .

2. Впервые исследована кинетика люминесценции и фотохимическая устойчивость по отношению к УФ лазерному излучению смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YbF}_3$. Показано, что соактивация кристаллов $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ ионами Yb^{3+} создает дополнительный канал рекомбинации свободных носителей заряда, конкурирующий с процессами их захвата

дефектами кристалла, и тем самым достигается эффект подавления процессов образования центров окраски в этих УФ активных средах.

3. Впервые исследованы нелинейные процессы поглощения и усиления оптического излучения в области 4f-5d межконфигурационных переходов ионов Ce^{3+} в твердых растворах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YbF}_3$. Установлено, что индуцированные излучением накачки потери в области длин волн люминесценции ионов Ce^{3+} в исследованных активных средах обусловлены в основном поглощением центров окраски, а не поглощением из возбужденных 5d-состояний ионов Ce^{3+} . Определены основные характеристики активных сред, важные с точки зрения получения на их основе вынужденного УФ излучения.

4. Разработана методика исследования динамических процессов в твердотельных УФ активных средах непосредственно в условиях лазерной генерации. Определены основные параметры динамических процессов в активных средах, обусловленных образованием, накоплением и разрушением в них центров окраски.

5. Впервые исследованы лазерные характеристики активных сред УФ диапазона на основе смешанных кристаллов $\text{LiF-LuF}_3\text{-YbF}_3:\text{Ce}^{3+}$. Показано, что активная среда на основе кристалла $\text{LiLu}_{0,99}\text{Yb}_{0,01}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ обладает рекордным для лазеров данного типа значением дифференциального КПД лазерной генерации, составляющим 62%.

Научная значимость и практическая ценность.

Установлены оптимальные соотношения концентраций ионов $\text{Lu}^{3+}/\text{Y}^{3+}$ и $\text{Lu}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ в смешанных кристаллах двойных фторидов со структурой шеелита $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YbF}_3$ при которых реализуются максимальные ширина полосы усиления УФ излучения и дифференциальный КПД лазерной генерации в активных средах данного типа

Разработанная методика исследования динамических процессов в активных средах в режиме лазерной генерации позволяет комплексно охарактеризовать активные материалы и оценить перспективность их практического использования

Создана активная среда УФ диапазона спектра на основе кристалла $\text{LiLu}_{0,99}\text{Yb}_{0,01}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ с рекордным для лазеров данного типа значением дифференциального КПД лазерной генерации, составляющим 62%

Разработанные активные среды на основе смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YbF}_3$ имеют гораздо более низкую стоимость, чем их ближайший аналог – кристалл LiLuF_4 , поскольку стоимость фторида иттрия или иттербия в несколько раз ниже, чем стоимость фторида лютеция.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. В результате изменения соотношения концентраций ионов $\text{Lu}^{3+}/\text{Y}^{3+}$ в смешанных кристаллах $\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3:\text{Ce}^{3+}$ происходит изменение взаимного расположения энергетических состояний иона Ce^{3+} и центров окраски относительно зонной структуры кристаллов, что позволяет уменьшить сечение ионизации ионов Ce^{3+} на частоте излучения накачки и снизить коэффициент потерь в области длин волн возможной лазерной генерации.
2. При активации активной среды $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ ионами Yb^{3+} создается дополнительный канал рекомбинации индуцированных излучением накачки свободных носителей заряда, который составляет конкуренцию процессам их захвата дефектами кристаллической решетки. За счет этого уменьшаются потери в канале лазерной генерации активной среды, обусловленные образованием и накоплением центров окраски.
3. Разработанный метод исследования динамических процессов в твердотельных УФ активных средах в условиях лазерной генерации, заключающийся в исследовании зависимостей энергии лазерного излучения от энергии накачки в различных условиях, позволяет определить основные характеристики активной среды и наиболее корректно оценить перспективность ее практического использования
4. Созданная активная среда на основе кристалла $\text{LiLu}_{0,99}\text{Yb}_{0,01}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ обладает рекордным ($\sim 62\%$) значением дифференциального КПД лазерной генерации среди всех известных твердотельных УФ активных сред. Данное значение дифференциального КПД лазерной генерации является близким по своему значению к квантовому КПД генерации, устанавливающему теоретический предел для КПД активных сред.

Достоверность результатов.

Исследования проводились на современном поверенном оборудовании. Методики измерения в своем большинстве являются общепринятыми и корректными. Основные результаты настоящей диссертации неоднократно докладывались на конференциях различного уровня и частично уже подтверждены другими исследованиями.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на: XI и XII Международных Феофиловских симпозиумах по спектроскопии кристаллов, активированных редкоземельными ионами и ионами переходных металлов (2001 г. Казань и 2004 г. Екатеринбург); Международной конференции «On New Laser Technologies and Application» (2002 Патры Греция); VI и VII Всероссийских школах молодых ученых по оптике и спектроскопии (2002 г. Казань и 2003 г. Казань); III Международной конференции молодых ученых по прикладной физике (2003 г. Киев); IX Международных чтениях по квантовой оптике, (2003 г. Санкт-Петербург); Международной конференции ICONO/LAT 2005 (2005 г. Санкт-Петербург); Итоговой конференции физического факультета Казанского государственного университета (2006 г. Казань), IX Международной конференции “Hole Burning, Single Molecule and Related Spectroscopies: Science and Applications” (2006 г. Оссуаз, Франция), «VI International Conference on f-elements» (2006 г. Вроцлав, Польша); VI Научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов НОЦ КГУ «Материалы и технологии XXI века» (2006 г. Казань).

Публикации.

Основное содержание диссертации отражено в 18 научных публикациях.

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц машинописного текста, который включает 54 рисунка, 3 таблицы, список литературы из 63 наименований.

Основное содержание работы.

В первой главе обсуждаются основные особенности межконфигурационных $4f^n-4f^{n-1}5d$ переходов редкоземельных ионов и перспективы их использования в качестве рабочих переходов лазеров и оптических усилителей УФ диапазона спектра.

Особое внимание уделено обзору результатов исследований спектроскопических и фотохимических свойств Се-активированных сред различного химического состава. При этом акцент сделан на изменчивость свойств материалов, составляющих гомологические ряды кристаллов. На многочисленных примерах продемонстрировано, что химический состав кристаллов оказывает влияние на все их основные оптические и фотохимические свойства, которые в конечном итоге определяют лазерные характеристики активных сред на их основе. Показано, что, изменяя, например, катионный состав кристаллической матрицы, можно целенаправленно управлять свойствами активной среды и добиваться наилучшего совпадения ее характеристик с требованиями практических приложений. Наиболее детально проведен анализ имеющихся в литературе данных о спектрально-кинетических, спектроскопических и лазерных свойствах, а также фотохимической устойчивости активных сред $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ и $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$. Обращается внимание на деградацию лазерных характеристик этих активных сред в процессе их эксплуатации.

Во второй главе приводится гипотетическая модель динамических процессов, индуцируемых в твердотельных активных средах УФ излучением накачки. Указывается, что определяющим фактором, который служит причиной деградации лазерных характеристик активных сред на основе кристаллов двойных фторидов со структурой шеелита, активированных ионами Ce^{3+} , является двухступенчатое поглощение фотонов накачки, причем второй квант накачки испытывает поглощение из возбужденного состояния примеси в зону проводимости кристаллической матрицы. Этот процесс сопровождается изменениями валентности активаторных ионов, фотопроводимостью, захватом свободных носителей заряда состояниями дефектов кристаллической структуры и образованием в активных средах центров окраски различной природы (соляризации материала). Указывается, что поглощение центров окраски является одним из основных источников потерь, приводящих к низкой эффективности УФ лазерной генерации или

даже невозможности ее получения. Показано, что одновременно с процессами образования и накопления центров окраски в активных средах наблюдаются также и процессы их разрушения в результате термического и оптического высвобождения захваченных на состояниях дефектов кристаллической решетки носителей заряда. Обсуждаются возможные пути управления динамикой процессов образования и разрушения центров окраски. Показано, что наиболее перспективным методом уменьшения коэффициента потерь в активных средах, связанных с образованием в них центров окраски, является создание дополнительных центров рекомбинации свободных носителей заряда. В частности, для создания таких центров рекомбинации предлагается соактивировать кристаллы $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$ ионами Yb^{3+} . Приводится обоснование такого выбора.

Третья глава представляет собой сравнительный анализ некоторых кристаллохимических свойств и спектрально-кинетических характеристик ионов Ce^{3+} в смешанных кристаллах состава $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$.

В первой части главы показано, что соединения двойных фторидов $\text{LiF-LuF}_3-\text{YF}_3$ или $\text{LiF-LuF}_3-\text{YbF}_3$ допускают изоморфную совместимость фторидов лития, иттрия и лютеция при любом их соотношении. При этом образуется непрерывный ряд смешанных кристаллов (твердых растворов) со структурой шеелита, подчиняющихся правилам Вегарда и Ретгерса. Констатируется, что спектроскопические характеристики примесных центров ионов Ce^{3+} в образцах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$, а также их параметры решетки изменяются непрерывно с изменением соотношения концентраций ионов Lu^{3+} и Y^{3+} .

Во второй части приводятся результаты исследования кинетик затухания 5d-4f люминесценции ионов Ce^{3+} в смешанных кристаллах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$. Обнаружено, что наряду с флюоресценцией, характеризующейся временем жизни наиболее низкоэнергетичного возбужденного 5d-состояния ионов Ce^{3+} , в кривой затухания люминесценции смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ наблюдается рекомбинационная составляющая. Ее наличие обусловлено процессами двухфотонного поглощения излучения возбуждения, в результате чего индуцируются свободные носители заряда, которые затем рекомбинируют на ионах Ce^{3+} , оставляя их в возбужденном состоянии.

Показано, что вес рекомбинационной компоненты в кинетике люминесценции ионов Ce^{3+} в смешанных кристаллах увеличивается с ростом отношения концентраций ионов Lu^{3+} к ионам Y^{3+} . Именно этим объясняется вдвое больший квантовый выход люминесценции ионов Ce^{3+} в кристаллах LiLuF_4 по сравнению с кристаллами LiYF_4 .

В смешанных кристаллах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$ увеличение содержания ионов Yb^{3+} приводит к тушению люминесценции ионов Ce^{3+} , проявляющемуся в укорочении времени жизни его возбужденного 5d-состояния. При этом рекомбинационная компонента в кинетике люминесценции не наблюдается, что косвенно свидетельствует о том, что ионы Yb^{3+} являются более эффективными центрами рекомбинации свободных носителей заряда, чем ионы Ce^{3+} .

В третьей части главы 3 показано, что с увеличением концентрации ионов Yb^{3+} не только уменьшается квантовый выход люминесценции ионов Ce^{3+} , но и снижается коэффициент поглощения индуцированных УФ излучением возбуждения центров окраски в области длин волн люминесценции ионов Ce^{3+} . Определен диапазон концентраций ионов Yb^{3+} , при котором уже существенен эффект подавления процессов образования центров окраски в кристаллах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$ и, одновременно, наблюдается лишь незначительное снижение квантового выхода 5d-4f люминесценции ионов Ce^{3+} .

В четвертой главе приводятся результаты исследований пропускания твердых растворов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ и $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{0,95}\text{Yb}_{0,05}\text{F}_4$ в условиях значительной населенности возбужденного состояния. Установлено, что индуцированные излучением накачки потери в области длин волн люминесценции ионов Ce^{3+} в исследованных активных средах обусловлены в основном поглощением центров окраски, а не поглощением из возбужденных 5d-состояний ионов Ce^{3+} . Продемонстрировано, что смешанные кристаллы $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YF}_3$ обладают рядом преимуществ по сравнению с ранее известными активными средами – $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$ и $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$. В частности, показано, что при изменении соотношения концентрации ионов Lu^{3+} и Y^{3+} в составе смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF}-\text{LuF}_3-\text{YF}_3$ удается добиться увеличения полосы усиления оптического УФ излучения, изменения сечения поглощения из возбужденного состояния ионов Ce^{3+} , сечения поглощения и времени жизни центров окраски, индуцированных излучением накачки.

Кроме того, продемонстрирован антисоляризация эффект, заключающийся в исчезновении или уменьшении интенсивности полос окраски в активных средах в присутствии в их составе ионов Yb^{3+} . Именно этим обусловлено значительное превышение коэффициента усиления этих Yb -содержащих активных сред по сравнению с другими средами, исследуемыми в рамках настоящей работы.

Пятая глава посвящена исследованию кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$ в режиме лазерной генерации. Обнаружено, что зависимость энергии лазерной генерации от энергии накачки обладает гистерезисом, который обусловлен динамическим равновесием между процессами образования, накопления и разрушения центров окраски. Результаты лазерных экспериментов также подтверждают антисоляризация эффект, заключающийся в подавлении процессов образования и накопления индуцированных излучением накачки центров окраски в исследуемых активных средах в присутствии ионов Yb^{3+} . С целью интерпретации ранее ненаблюдаемой гистерезисной зависимости энергии лазерной генерации от энергии накачки была разработана методика обработки данных лазерного эксперимента, позволившая определить коэффициент полных внутрирезонаторных потерь. Этот коэффициент включает в себя коэффициенты поглощения центров окраски и поглощения из возбужденных $5d$ -состояний ионов Ce^{3+} . Одним из важных моментов данной главы является демонстрация возможностей лазерных экспериментов, которые сами по себе могут служить мощным исследовательским инструментом для определения основных параметров фотодинамических процессов, определяющих лазерные характеристики активных сред. Представлены результаты оценок основных параметров активных сред.

Наконец, в конце 5 главы приводятся результаты лазерных тестов активной среды с химическим составом, оптимизированным с точки зрения достижения максимальных энергетических характеристик лазерной генерации. Показано, что активная среда состава $\text{LiLu}_{0,99}\text{Yb}_{0,01}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ (1 ат.%) имеет рекордный дифференциальный КПД лазерной генерации, приближающийся по своему значению к теоретически возможному для активных сред данного типа.

В заключении обобщены результаты и сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Основные результаты настоящей диссертационной работы:

1. Показано, что твердые растворы $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ образуют непрерывный ряд кристаллов со структурой шеелита. При этом непрерывно смещаются полосы 4f-5d поглощения и люминесценции ионов Ce^{3+} и полосы поглощения центров окраски.

2. Установлено, что люминесценция ионов церия в смешанных кристаллах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_4$ частично носит рекомбинационный характер, и именно большим весом рекомбинационной компоненты в кинетике люминесценции объясняется вдвое больший квантовый выход люминесценции ионов Ce^{3+} в кристаллах LiLuF_4 по сравнению с кристаллами LiYF_4 .

3. Показано, что ион Yb^{3+} в смешанных кристаллах $\text{Ce}^{3+}:\text{LiLu}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_4$ является эффективным центром рекомбинации свободных носителей заряда. За счет этого происходит подавление процессов образования центров окраски в активных средах в присутствии в их составе ионов Yb^{3+} .

4. Установлено, что наведенные излучением накачки потери в области длин волн люминесценции ионов Ce^{3+} в кристаллах $\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ обусловлены в основном поглощением центров окраски, а не поглощением из возбужденного 5d-состояния ионов Ce^{3+} .

5. Показано, что при изменении соотношения концентрации ионов Lu^{3+} и Y^{3+} в составе смешанных кристаллов $\text{Ce}^{3+}:\text{LiF-LuF}_3\text{-YF}_3$ удается добиться увеличения полосы усиления оптического УФ излучения, изменения сечения поглощения из возбужденного состояния ионов Ce^{3+} , сечения поглощения и времени жизни центров окраски, индуцированных излучением накачки.

6. Разработана методика исследования динамических процессов в твердотельных УФ активных средах непосредственно в условиях лазерной генерации.

7. Создана активная среда с рекордным КПД лазерной генерации. Показано, что химический состав активной среды $\text{LiLu}_{0,99}\text{Yb}_{0,01}\text{F}_4:\text{Ce}^{3+}$ (1 ат.%)

является оптимальным с точки зрения достижения максимальных энергетических характеристик.

Литература:

1. Coutts D. W. Cerium-Doped Fluoride Lasers/ D. W. Coutts, A. J. S. McGonigle// IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2004. – V. 40. – № 10. – P. 1430–1440.
2. Семашко В. В. Проблемы поиска новых твердотельных активных сред ультрафиолетового и вакуумно-ультрафиолетового диапазонов спектра: роль фотодинамических процессов/ В. В. Семашко// ФТТ. – 2005. – Т. 47. – N 5. – С.1450–1454.
3. Elias L. R. Excitation of UV fluorescence in LaF₃ doped with trivalent cerium and praseodymium/ L. R. Elias, W. S. Heaps, W. M. Yen// Phys. Rev. B. – 1973. – V. 8. – № 11. – P. 4989–4995.
4. Yang K.-H. UV fluorescence of cerium-doped lutetium and lanthanum trifluorides, potential tunable coherent sources from 2760-3220 Å/ K.-H. Yang, J. A. DeLuca// Appl. Phys. Lett. – 1977. – V. 31. – P. 594–596.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Nizamutdinov A. S. Photodynamic nonlinear processes in UV solid-state active media and approaches to improving material laser performance/, V. V. Semashko, M. A. Dubinskii, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov, M. S. Zhuchkov// SPIE Proceedings. – V. 4766-17. – P. 119–126.
2. Nizamutdinov A. S. Photodynamic processes in Ce³⁺:LiLuF₄ ultra-violet active medium/ V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva// Proceedings of III International Young Scientists Conference on Applied Physics. – Kyiv, 2003. – P. 49–50.
3. Nizamutdinov A. S. Photodynamic processes in Ce+Yb:CaF₂ crystals investigation/ A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva// Proceedings of VII All Russian Young Scientists School on Optics and Spectroscopy. – Kazan, 2003. – P. 339–344.

4. Nizamutdinov A. S. Laser tests as a tool for studying photodynamic processes in UV active media/ V. V. Semashko, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva// SPIE Proc. – 2004. – V. 5402. – P. 421–429.
5. Nizamutdinov A. S. Photodynamic processes in Ce+Yb:CaF₂ crystals investigation/ A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, M. A. Marisov// SPIE Proc. – 2004. – V. 5402. – P. 412–420.
6. Низамутдинов А. С. Спектрально-кинетические характеристики ионов Ce³⁺ в кристаллах двойных фторидов со структурой шеелита/ А. С. Низамутдинов, М. А. Марисов, В. В. Семашко, А. К. Наумов, Р. Ю. Абдулсабиров, С. Л. Кораблева// Физика Твёрдого Тела. – 2005. – Т. 47. – № 5. – С. 1406–1408.
7. Низамутдинов А. С. Исследование фотодинамических процессов в кристаллах CaF₂, активированных ионами Ce³⁺ и Yb³⁺/ А. С. Низамутдинов, В. В. Семашко, А. К. Наумов, Р. Ю. Абдулсабиров, С. Л. Кораблева, М. А. Марисов// Физика Твёрдого Тела. – 2005. – Т.47 – № 5. – С.1403–1405.
8. Nizamutdinov A. S. Optical and gain properties of series of crystals LiF–YF₃–LuF₃ doped with Ce³⁺ and Yb³⁺ ions/ A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko, A. K. Naumov, S. L. Korableva, R. Yu. Abdulsabirov, A. N. Polivin, M. A. Marisov// Journal of Luminescence. – 2007. – режим доступа: doi:[10.1016/j.jlumin.2007.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2007.02.011).
9. Nizamutdinov A. S. Photodynamic nonlinear processes in UV solid state active media and approaches to improving material laser performance/ V. V. Semashko, M. A. Dubinskii, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov, M. S. Zhuchkov// Int. XI Feofilov Symp. On spectr. Of crystals activated by rare-earth and transition metal ions: abst. – Kazan, 2001. – TU9.
10. Nizamutdinov A. S. On the analysis of the key photodynamic processes in a solarizable UV active medium based on laser experimental data/ V. V. Semashko, M. A. Dubinskii, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov,

M. S. Zhuchkov// Int. XI Feofilov Symp. On spectr. Of crystals activated by rare-earth and transition metal ions: abst. – Kazan, 2001. – P15.

11. Nizamutdinov A. S. Spectral-kinetic properties of $\text{LiLuF}_4:\text{Ce}^{3+}$, $\text{LiYF}_4:\text{Ce}^{3+}$ and $\text{KY}_3\text{F}_{10}:\text{Ce}^{3+}$ single crystals coactivated by Yb^{3+} ions/ V. V. Semashko, M. A. Dubinskii, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov, M. S. Zhuchkov/ Int. XI Feofilov Symp. On spectr. Of crystals activated by rare-earth and transition metal ions: abst. – Kazan, 2001. – P7.

12. Nizamutdinov A. S. The role of photodynamic nonlinear processes in rare-earth doped crystals in the search for new UV/VUV solid-state active media/ V. V. Semashko, M. A. Dubinskii, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. R. Bajazitov, A. S. Nizamutdinov, M. S. Zhuchkov// Tech.Digest of GR-I Int. Conf. on New Laser. Technologies and application: abst. – Patras, 2002. – FP17.

13. Nizamutdinov A. S. $5d4f^{n-1} \rightarrow 4f^n$ interconfigurational transition kinetic properties in Ce^{3+} doped LiMeF_4 (Me = Y, Lu, Yb) crystals / V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. S. Nizamutdinov, M. A. Marisov// XII Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare-earth and transition metal ions: abst. – Ekaterinburg-Zarechnyi, 2004. – P. 112.

14. Nizamutdinov A. S. Photodynamic processes in CaF_2 crystals double-doped by Ce^{3+} and Yb^{3+} ions/ V. V. Semashko, A. K. Naumov, R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, A. S. Nizamutdinov, M. A. Marisov// XII Feofilov symposium on spectroscopy of crystals activated by rare-earth and transition metal ions: abst. – Ekaterinburg-Zarechnyi, 2004. – P.116

15. Низамутдинов А. С. Кинетические характеристики $5d4f^{n-1}-4f^n$ межконфигурационных переходов ионов Ce^{3+} в кристаллах LiMeF_4 (Me = Y, Lu, Yb)/ М. А. Марисов, А. С. Низамутдинов, В. В. Семашко, А. К. Наумов, Р. Ю. Абдулсабиров, С. Л. КорABLEVA// VIII международная молодежная научная школа «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия: сб. трудов. – Казань, 2004. – С. 13.

16. Nizamutdinov A. S. Laser-related spectroscopy of $\text{KY}_{3-x}\text{Yb}_x\text{F}_{10}:\text{Ce}^{3+}$ crystals/ R. Yu. Abdulsabirov, S. L. Korableva, M. A. Marisov, A. K. Naumov, A. S. Nizamutdinov, V. V. Semashko// ICONO-LAT Conf. – St.Petersburg, 2005. – LThK11.

17. Nizamutdinov A. Impact of host cation nature on laser-related properties of $\text{Ce}:\text{LiMeF}_4$ (Me=Y and Lu) UV active media/ A. Nizamutdinov, M. Marisov, V. Semashko, A. Naumov, R. Abdulsabirov, S. Korableva, L. Nourtdinova// 6th International Conference on f-elements. – Wrocław, 2006. – B_312_P.

18. Низамутдинов А. С. Фотодинамические процессы в кристаллах CaF_2 , активированных ионами Ce^{3+} и Yb^{3+} / А. С. Низамутдинов, В. В. Семашко, А. К. Наумов, Р. Ю. Абдулсабиров, С. Л. Кораблева, М. А. Марисов// VI Научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов НОЦ КГУ «Материалы и технологии XXI века»: сб. трудов. – Казань, 2006. – С. 73.