

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.3.038.825.2

РУДЕНКОВ
Александр Сергеевич

**СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ И РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА КРИСТАЛЛАХ ВОЛЬФРАМАТОВ, ВАНАДАТОВ
И АЛЮМИНАТОВ С ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Минск, 2018

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель: **КИСЕЛЬ Виктор Эдвардович**,
кандидат физико-математических наук,
доцент, заведующий НИЦ «Оптических
материалов и технологий» филиала БНТУ
«Научно-исследовательский политехниче-
ский институт»

Официальные оппоненты: **ТИХОМИРОВ Сергей Александрович**,
член-корреспондент НАН Беларуси, доктор
физико-математических наук, профессор,
заместитель академика-секретаря Отделения
физики, математики и информатики НАН
Беларуси

ЗНОСКО Казимир Францевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры теоретической физики и
теплотехники УО «Гродненский государ-
ственный университет имени Янки Купалы»

Оппонирующая
организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится «13» декабря 2018 г. в 13⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (017) 293-96-18, e-mail: D.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «06» ноября 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук

Н. Н. Ризноокая

© Руденков А. С., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные лазеры с диодной накачкой, генерирующие ультракороткие лазерные импульсы (УКИ) находят широкое применение в науке и технике, высокотехнологичном промышленном производстве, медицине, прецизионной обработке материалов.

Широкое распространение для получения УКИ нашли кристаллы с трехвалентными ионами иттербия (Yb^{3+}), имеющие широкие и интенсивные полосы усиления в спектральной области около 1 мкм, а также сильные полосы поглощения в диапазоне излучения коммерчески доступных мощных InGaAs лазерных диодов. Простая структура энергетических уровней иона Yb^{3+} исключает влияние ап-конверсионных и кросс-релаксационных паразитных эффектов на параметры лазера. Для иттербиевых материалов характерно низкое тепловыделение вследствие работы по квази-трехуровневой схеме генерации с характерными значениями Стоксова сдвига между длинами волн накачки и генерации около 5 %, что особенно актуально при работе лазера с высокой средней выходной мощностью.

Основными вопросами в области развития фемтосекундной лазерной техники являются увеличение энергии и сокращение длительности генерируемых лазерных импульсов с целью повышения их пиковой мощности. Разработка фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью обеспечивает энергию импульса порядка 100–200 нДж, сохранив при этом малую длительность и высокую частоту следования импульсов. При этом нет необходимости в использовании дорогостоящих компонентов и электронных блоков. Кардинально увеличить энергию импульса (до уровня мкДж–мДж) позволяют системы регенеративного усиления УКИ. К достоинствам данных систем следует отнести возможность получения высокой пиковой мощности импульса (до единиц ГВт) при сравнительно небольших габаритах системы усиления (около 1 м² в плане) и невысокой мощности источника излучения накачки (десятки Вт). Актуальной задачей для лазерных систем генерации и усиления УКИ также является увеличение средней выходной мощности.

Для сокращения длительности УКИ необходимо наличие широкого спектра усиления активной среды. Как правило, такие среды имеют искаженную или разупорядоченную структуру, что приводит к уширению спектра усиления. Однако искажение структуры материала приводит к существенному снижению теплофизических свойств, что не позволяет использовать такие среды в системах с высокой средней мощностью.

Таким образом, актуальными в настоящее время являются исследования по разработке новых активных сред на основе иттербиевых материалов сочетающих широкий спектр усиления и высокие теплофизические

свойства. А также разработка новых и усовершенствование уже имеющихся схемных решений для улучшения параметров фемтосекундных лазеров и систем усиления.

В диссертационной работе представлены результаты исследования спектроскопических и генерационных характеристик кристаллов вольфраматов ($KY(WO_4)_2$, $KGd(WO_4)_2$), ванадатов (YVO_4) и алюминатов ($CaYAlO_4$, $LuAlO_3$), легированных ионами Yb^{3+} , рассматриваемых в качестве активных сред фемтосекундных лазеров и систем усиления УКИ, излучающих в диапазоне 1 мкм.

На момент постановки задач диссертационного исследования информации о получении режима пассивной синхронизации мод (ПСМ) лазера на основе кристаллов $Yb^{3+}:CaYAlO_4$, $Yb^{3+}:LuAlO_3$ обнаружено не было. Регенеративное усиление чирпированных фемтосекундных импульсов на основе кристаллов $Yb^{3+}:YVO_4$, $Yb^{3+}:CaYAlO_4$, $Yb^{3+}:LuAlO_3$ реализовано впервые в данной работе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Основные результаты диссертационной работы получены при выполнении:

Государственной программы научных исследований «Электроника и Фотоника» на 2011–2015 годы в рамках заданий: 2.1.11 № ГР 20111353; 2.2.01 № ГР 20111355.

Государственной научно-технической программы «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» («Эталон и научные приборы») научно-технической подпрограммы «Разработать и изготовить научно-учебные комплексы и оборудование» («Научно-учебное оборудование») задание 14 № ГР 20120219.

Государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Фотоника», «Разработка методов генерации мощного фемтосекундного излучения для терагерцевых диагностических систем» в рамках заданий: 1.1.05 № ГР 20160624; 1.1.02 № ГР 20160625.

Государственной научно-технической программы «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» («Эталон и научные приборы») научно-технической подпрограммы «Разработать и изготовить научно-учебные комплексы и оборудование» («Научно-учебное оборудование») задание 39 № ГР 20171599.

Диссертационная работа соответствует:

– приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. № 585: «6.4. Новые типы лазеров в широком спектральном, временном и мощностном диапазонах, в том числе твердотельные и волоконно-оптические лазеры, лазеры на свободных электронах» и «6.5. Физические основы и разработка лазерных, оптико-электронных технологий и приборов, в том числе приборов ночного видения»;

– приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190: «6. Электроника и фотоника».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является создание систем генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов, сочетающих высокую среднюю мощность, короткую длительность импульса и высокую эффективность генерации в спектральном диапазоне около 1 мкм, на кристаллах вольфраматов, ванадатов и алюминатов, активированных ионами Yb^{3+} .

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. определить спектроскопические свойства новых кристаллических сред, активированных трехвалентными ионами иттербия Yb^{3+} ;
2. исследовать генерационные характеристики и разработать новые схемные решения для лазерных систем генерации и усиления УКИ на известных иттербиевых материалах;
3. исследовать генерационные характеристики новых иттербиевых сред в режимах непрерывной генерации и пассивной синхронизации мод при продольной диодной накачке;
4. определить особенности использования исследованных иттербиевых сред для эффективного регенеративного усиления широкополосных фемтосекундных лазерных импульсов.

Объектом исследования являлись системы генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов на кристаллах вольфраматов, ванадатов и алюминатов, активированных ионами Yb^{3+} .

Предметом исследования являлись спектроскопические характеристики указанных материалов, а также энергетические, спектральные, временные характеристики выходного излучения систем генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов на кристаллах вольфраматов, ванадатов и алюминатов, активированных ионами Yb^{3+} .

Научная новизна

Установлено, что высокие поперечные сечения поглощения (ПОС) и стимулированного излучения (СИ) в кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ для излу-

чения с поляризацией, параллельной оси оптической индикатрисы показателя преломления N_m ($E//Nm$) обеспечивают высокую среднюю мощность (более 8.5 Вт), высокую оптическую эффективность генерации (более 37 %) и короткую длительность импульса (менее 170 фс) в режиме ПСМ с центральной длиной волны около 1026 нм при накачке лазерными диодами в области 980 нм.

Установлена связь генерационных характеристик лазеров на кристаллах двойных вольфраматов с концентрацией трехвалентных ионов иттербия и показано, что увеличение концентрации ионов Yb^{3+} с 5 ат.% до 10 ат.% обеспечивает расширение диапазона перестройки длины волны лазера при одинаковом уровне выходной мощности, а также сокращение длительности генерируемых фемтосекундных импульсов для поляризации $E//Nm$ вследствие смещения полосы эффективного усиления в длинноволновую область при постоянных активных потерях лазера.

Впервые получен режим ПСМ в лазере на кристалле $Yb^{3+}:YVO_4$ для σ -поляризации (вектор E перпендикулярен оптической оси кристалла), имеющей коротковолновый сдвиг спектров СИ. Получены импульсы длительностью 175 фс со средней мощностью 0.63 Вт на длине волны около 1008 нм. Впервые продемонстрировано регенеративное усиление chirпированных УКИ в кристалле $Yb^{3+}:YVO_4$ и получены импульсы длительностью 200 фс со средней мощностью 4.2 Вт при частоте следования 200 кГц.

Показано, что широкие и практически бесструктурные полосы СИ в кристалле $Yb^{3+}:CaYAlO_4$ обеспечивают получение плавной перестройки длины волны от 982 нм до 1086 нм в режиме непрерывной генерации, а также регенеративное усиление фемтосекундных лазерных импульсов с минимальным сужением спектра усиленного импульса для π -поляризации излучения (вектор E параллелен оптической оси кристалла). Получены импульсы длительностью 203 фс со средней мощностью около 2.8 Вт и центральной длиной волны около 1032 нм для π -поляризации и импульсы длительностью 300 фс со средней мощностью 4 Вт и центральной длиной волны около 1037 нм для σ -поляризации при частоте следования 200 кГц.

Впервые определены спектроскопические характеристики кристаллов лютециевого алюмината ($LuAlO_3$), легированных трехвалентными ионами иттербия Yb^{3+} в поляризованном свете. Измерены спектры поглощения, времена жизни верхнего лазерного состояния ${}^2F_{5/2}$, рассчитаны значения поперечных сечений ПОС и СИ.

Впервые реализованы лазеры на кристалле $Yb^{3+}:LuAlO_3$ работающие в режимах непрерывной генерации и ПСМ. Продемонстрирована выходная мощность более 9 Вт в режиме непрерывной генерации с дифференциальной эффективностью более 73 % на длине волны около 1041 нм. В режиме ПСМ получены импульсы длительностью 130 фс со средней мощностью

7 Вт при частоте следования импульсов 70 МГц на центральной длине волны около 1017 нм.

Установлены зависимости генерационных характеристик лазера на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ в процессе регенеративного усиления chirпированных фемтосекундных импульсов, в частности впервые показано, что особенности структурированной полосы сечений СИ в кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризации параллельной кристаллографической оси c кристалла ($E//c$) обеспечивают увеличение спектральной ширины усиленных фемтосекундных импульсов задающего лазера с центральной длиной волны в диапазоне (1035–1045) нм и шириной около 12 нм за счет дискриминации центральных и эффективного усиления периферических спектральных компонент фемтосекундных импульсов.

Предложена оригинальная схема осевой продольной накачки, обеспечивающая спектральную и поляризационную независимость пучка накачки и моды резонатора лазера, что позволило реализовать перестройку длины волны лазера в режиме непрерывной генерации с рекордно малым стоковым сдвигом на основе материалов с ионами Yb^{3+} , исследованными в данной работе. Например, при использовании кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ получена перестройка длины волны генерации лазера в диапазоне более 100 нм от 982 до 1086 нм при накачке в области 980 нм.

Положения, выносимые на защиту

1. Высокая оптическая эффективность генерации (37.5 %) с высокой средней мощностью (8.8 Вт) и короткой длительностью импульса (162 фс) в режиме пассивной синхронизации мод на кристалле $\text{Yb}^{3+}(\text{5at.}\%):\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ для поляризации $E//Nm$ получены впервые и обеспечиваются эффективной работой лазера при уменьшенной длине активного элемента (до 1.5 мм) и увеличенном радиусе TEM_{00} моды в активном элементе (до 90 мкм) за счет высоких поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания в спектральной области около 1 мкм.

2. Увеличение концентрации ионов Yb^{3+} в активных элементах лазеров на кристаллах двойных вольфраматов с 5 ат.% до 10 ат.% приводит к расширению до 20 % диапазона перестройки длины волны в режиме непрерывной генерации в спектральной области около 1 мкм и сокращению длительности генерируемых фемтосекундных импульсов до 29 % для поляризации $E//Nm$, вследствие смещения полосы эффективного усиления в длинноволновую область при постоянных активных потерях лазеров.

3. Плавная перестройка длины волны генерации лазера на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ в непрерывном режиме в диапазоне от 982 нм до 1082 нм, а также усиление широкополосного излучения фемтосекундного лазера с минимальным сужением спектра в системе регенеративного усиления на этом

кристалле обеспечивается его широкими и практически бесструктурными полосами сечений стимулированного испускания для π -поляризации.

4. Увеличение до 27 % полуширины спектра усиленных фемтосекундных импульсов задающего лазера с центральной длиной волны в диапазоне 1035–1045 нм и шириной около 12 нм в системе регенеративного усиления на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризации $E//c$ обусловлено особенностью формы спектра поперечных сечений стимулированного испускания, которая приводит к дискриминации центральных, совпадающих с минимумом, и эффективному усилению периферических спектральных компонент фемтосекундных импульсов, совпадающих с максимумами спектра поперечных сечений стимулированного испускания.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены соискателем самостоятельно. Автору принадлежит формулировка цели и задач исследования, выбор экспериментальных методик, проведение экспериментов и интерпретация результатов, формулировка выводов и положений, выносимых на защиту.

Научному руководителю работы В. Э. Киселю принадлежит определение общей тематики и направления проведения исследований, консультирование при выборе экспериментальных методик, участие в обсуждении полученных результатов и формулировке защищаемых положений. Соавтор А. С. Ясюкевич (НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ) консультировал по вопросам измерений спектроскопических характеристик и моделирования работы лазерных систем. Н. В. Кулешов (НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ) оказывал консультативную помощь при подготовке диссертации и написании статей. Соавторами А. Г. Петросяном, К. Л. Ованесян (Институт физических исследований НАН Армении), В. Н. Матросовым (ООО «СОЛИКС»), А. А. Павлюком (Институт неорганической химии им. А. В. Николаева, СО РАН) были выращены образцы исследуемых кристаллов. Соавторами А. А. Ковалевым, В. В. Преображенским, М. А. Путятю, Н. Н. Рубцовой и Б. Р. Семягиным (Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова, СО РАН) были выращены образцы пассивных затворов, использованных при исследовании режима синхронизации мод лазера. Остальные соавторы занимались вопросами, не вошедшими в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (Минск 2012–2017); Международная конференция «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно 2012); Европейская конференция по лазерам и электрооптике «CLEO/Europe» (Мюнхен, Германия 2013, 2015, 2017); 9-й и 11-й Белорусско-Российские семинары «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 2013, 2017); IV и VI Конгрессы физиков Беларуси (Минск 2013, 2017); Международная конференция по передовым твердотельным лазерам «ASSL» (Берлин, Германия 2015); Международная конференция по лазерам, их применениям и технологиям ICONO/LAT (Минск, 2016); Европейская конференция по твердотельным и волоконным источникам когерентного излучения «Europhoton» (Вена, Австрия 2016; Барселона, Испания, 2018); Международная конференция «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, Россия, 2018).

Результаты диссертации использованы при разработке активных кристаллов в ООО «СОЛИКС», при разработке системы регенеративного усиления chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов в лаборатории физики и техники полупроводников ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси», а также осуществлено внедрение результатов исследования в учебный процесс по специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» на кафедре лазерной техники и технологии Приборостроительного факультета БНТУ при изучении дисциплин «Твердотельные лазерные системы» и «Нелинейно-оптические устройства в лазерах», что подтверждено актами внедрения (3 акта внедрения и 1 справка о возможном практическом использовании результатов исследования).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 33 работах, в числе которых 10 статей в научных журналах из перечня ВАК (общим объемом 4,5 авторских листа), 10 статей в сборниках материалов конференций, 13 тезисов докладов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников, списка работ автора и приложений. Полный объем диссертации составляет 153 страницы, включая 86 рисунков на 28 страницах и 26 таблиц на 9 страницах, список

использованных источников из 186 наименований на 13 страницах, список публикаций соискателя ученой степени из 33 наименований на 5 страницах, 1 приложение на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **главе 1** рассмотрена актуальность развития фемтосекундных лазерных систем на основе кристаллов с ионами Yb^{3+} , проведен обзор спектроскопических свойств иона Yb^{3+} в различных кристаллических матрицах, рассмотрены существующие фемтосекундные лазеры и системы усиления УКИ на кристаллах с ионами Yb^{3+} , а также сформулированы цель и задачи исследования.

В **главе 2** приводится описание объектов исследования – кристаллов вольфраматов ($\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$), ванадатов (YVO_4) и алюминатов (CaYAlO_4 , LuAlO_3), легированных ионами Yb^{3+} . Описаны применяемое оборудование и установки для измерения спектроскопических характеристик активных сред, а также временных, пространственных и энергетических параметров лазерного излучения, которые обеспечивали решение основных задач диссертационной работы.

В **главе 3** диссертационной работы представлены результаты исследований спектроскопических характеристик, а также генерационных характеристик в непрерывном режиме при продольной диодной накачке исследуемых кристаллов.

В **разделе 3.1** приведены измеренные в поляризованном свете спектры поглощения и рассчитанные спектры поперечных сечений поглощения. Проведены оценки радиационного времени жизни возбужденного состояния ${}^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} в указанных кристаллах путем измерения времени затухания люминесценции в образцах с различной концентрацией активных центров и рассчитаны спектры поперечных сечений СИ. Для примера, на рисунке 1 представлены спектры коэффициента поглощения (Yb^{3+} (2 ат.%) : LuAlO_3), а также спектры поперечных сечений ПОС и СИ ионов Yb^{3+} в кристалле LuAlO_3 . Для кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ подобные исследования проведены впервые.

В **разделе 3.2** представлены результаты экспериментального исследования, а также проведено математическое моделирование режима непрерывной генерации лазера для оценки перспективности использования исследуемых кристаллов в качестве активных сред лазеров с высоким уровнем выходной мощности и апробации полученных спектроскопических характеристик.

В **подразделе 3.2.1** приведено описание математической модели лазера, работающего в режиме непрерывной генерации, основанной на системе

скоростных уравнений, определяющих населенности верхнего (${}^2F_{5/2}$) и нижнего (${}^2F_{7/2}$) мультиплетов ионов Yb^{3+} .

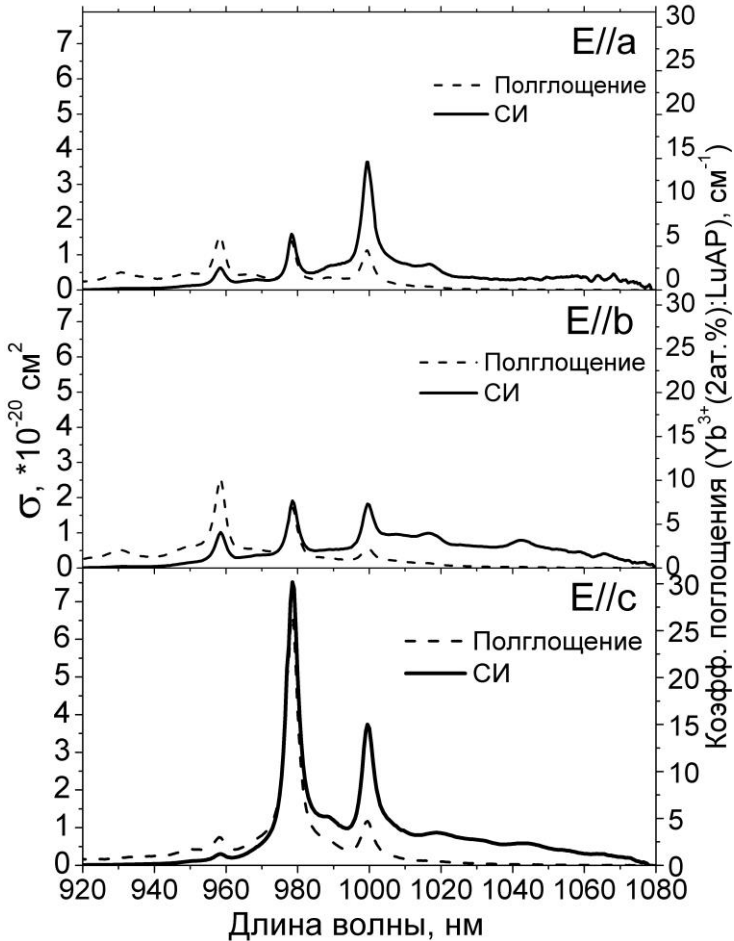


Рисунок 1. – Спектры коэффициента поглощения (штриховая линия), а также поперечных сечений поглощения (штриховая линия) и СИ (сплошная линия) кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ при комнатной температуре

В подразделе 3.2.2 приведено описание экспериментальной установки для исследования режима непрерывной генерации лазера (рисунок 2).

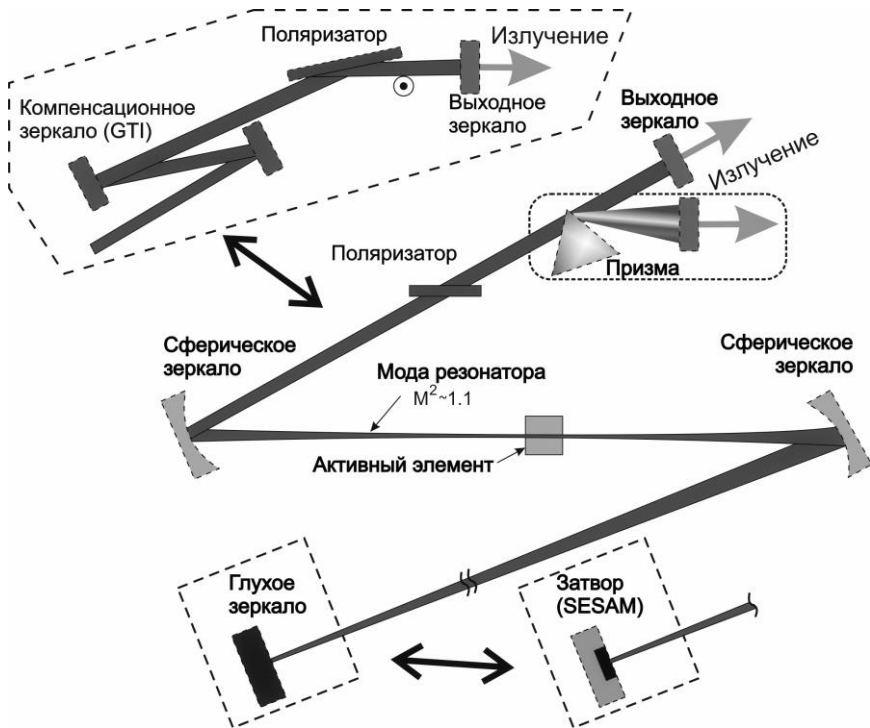


Рисунок 2. – Экспериментальная установка для исследования режимов непрерывной генерации и ПСМ

Четырехзеркальный резонатор рассчитан для работы в середине зоны стабильности. Одно из плоских зеркал выступало в качестве выходного зеркала. Остальные зеркала резонатора имели широкополосные высокоотражающие диэлектрические покрытия на длинах волн около 970–1150 нм. Селекция поляризации выходного излучения осуществлялась тонкопленочным поляризатором. Для перестройки длины волны излучения генерации лазера, в резонатор вводилась призма.

Из-за малого Стоксова сдвига между длинами волн накачки и генерации материалов, легированных ионами Yb^{3+} , широко распространенная схема накачки через разделительное зеркало вносит дополнительные внутрирезонаторные потери в области коротких длин волн. Для преодоления описанного недостатка автором работы была разработана новая схема осевой продольной накачки [3, 5], обеспечивающая спектральную и поляризационную независимость пучка накачки и моды резонатора (рисунок 3).

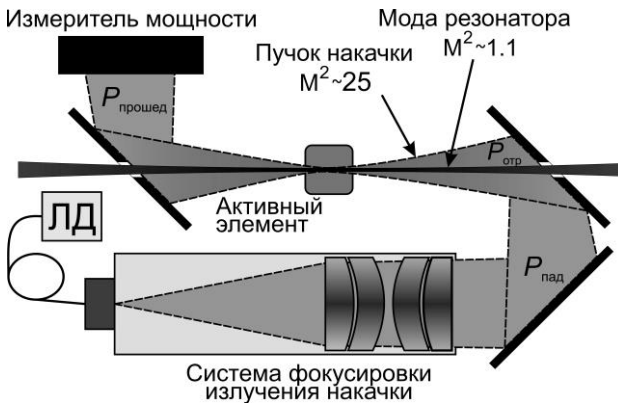


Рисунок 3. – Схема накачки активной среды

В данной схеме ввод излучения накачки в активный элемент осуществляется посредством дополнительного плоского зеркала с отверстием посередине, расположенного на оптической оси резонатора. Для измерения поглощенной мощности накачки, что особенно актуально для квазитрехуровневых сред, использовалось дополнительное зеркало с отверстием, отражающее прошедшее через активную среду излучение накачки на площадку измерителя мощности. Приведены оценки эффективности предложенной схемы накачки с учетом параметров используемого в работе источника излучения накачки и схемы резонатора.

Описанная схема накачки использовалась также в экспериментальных установках по исследованию режима ПСМ и регенеративного усиления УКИ.

Представлены результаты исследования режима непрерывной генерации лазера на исследуемых кристаллах, а также кривые перестройки длины волны генерации лазеров.

Проведенные экспериментальные и теоретические исследования генерационных характеристик лазеров на кристаллах с трехвалентными ионами иттербия в режиме непрерывной генерации при продольной диодной накачке показывают высокую перспективность применения исследованных сред для лазеров с высокими выходными мощностями (>5 Вт) и эффективностями генерации ($>50\%$), работающих в широком спектральном диапазоне длин волн. Эффективная генерация излучения в лазере на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ продемонстрирована впервые. Предложенная схема накачки позволила существенно расширить диапазон перестройки исследованных иттербиевых лазеров в коротковолновую область спектра.

В главе 4 диссертационной работы исследованы характеристики кристаллов с ионами Yb^{3+} в режиме ПСМ. Приведено описание схемы экспе-

риментальной установки лазера с ПСМ. Для реализации режима ПСМ в резонатор лазера устанавливался пассивный затвор *SESAM*. Для компенсации материальной дисперсии групповой скорости (ДГС) и фазового сдвига, вносимого фазовой самомодуляцией (ФСМ), с целью получения спектрально-ограниченных солитонных импульсов, в плечо резонатора со сколлимированным пучком вводились компенсационные зеркала с отрицательной ДГС (*Gires-Tournois Interferometer Mirrors (GTI)*) (см. рисунок 2). Параметры резонатора рассчитаны для работы в середине второй зоны стабильности, что обеспечивало возможность управления размером моды на затворе без использования дополнительных фокусирующих элементов, и режим ПСМ обеспечивался только свойствами затвора (*SESAM*). При разработке фемтосекундных лазеров с высокой средней мощностью рассмотрены основные факторы, влияющие на параметры генерируемого излучения в режиме ПСМ: снижение пороговой внутрирезонаторной энергии импульса путем уменьшения плотности энергии насыщения среды (использование сред с высокими поперечными сечениями СИ и ПОС), уменьшением глубины модуляции затвора и/или уменьшением радиуса моды резонатора в активной среде. При разработке лазера также учитывались ограничения связанные с нелинейностью вносимой ФСМ в активном элементе. Основной подход к увеличению средней выходной мощности состоял в сохранении внутрирезонаторной энергии импульса путем увеличения пропускания выходного зеркала, что позволяло поддерживать оптимальные значения описанных выше параметров и тем самым обеспечивало короткую длительность импульса при существенном увеличении средней выходной мощности.

В **разделах 4.1–4.4** представлены результаты исследований генерационных характеристик лазеров на кристаллах с ионами Yb^{3+} в режиме ПСМ.

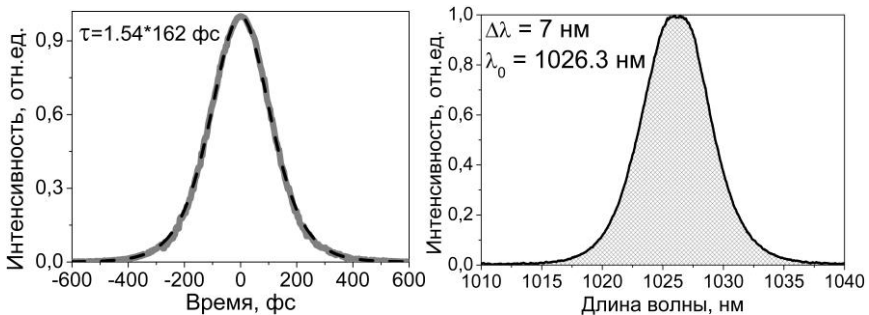
Режим ПСМ получен для всех исследованных кристаллов. В лазерах на кристаллах $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ и $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ из-за относительно низких поперечных сечений СИ максимальные уровни средней выходной мощности составили около 1 Вт. В случае кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ ограничение также вносит высокое значение нелинейного показателя преломления n_2 . Для σ -поляризации излучения в кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, имеющей коротковолновый сдвиг спектра СИ режим ПСМ получен впервые в мире, что стало возможным благодаря использованию разработанной автором диссертации схемы накачки.

Впервые в мире реализован режим генерации фемтосекундных импульсов в лазерах с диодной накачкой на основе кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$. Получены импульсы длительностью 130 фс со средней выходной мощностью 7 Вт на длине волны около 1017 нм при частоте следования 70 МГц для поляризации излучения $E//b$. Импульсы длительностью 840 фс со средней выходной мощностью 7.8 Вт и оптической эффективностью 31 %

получены для $E//c$ поляризации в спектральной области около 999 нм при диодной накачке в области 980 нм.

Реализован режим ПСМ в лазерах с диодной накачкой на основе кристаллов Yb^{3+} (5 ат.%) $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ с рекордным, на сегодняшний день, сочетанием параметров выходного излучения: длительности импульсов 162 фс и 143 фс, средней мощности 8.8 Вт и 8.6 Вт при частоте следования 62 МГц для поляризации излучения $E//Nm$ и $E//Np$, соответственно. На рисунке 4 представлены автокорреляционная функция и спектр импульсов длительностью 162 фс.

Энергия и пиковая мощность одиночного лазерного импульса непосредственно на выходе лазера составляли около 142 нДж и 1 МВт, соответственно, а максимальная оптическая эффективность достигала 37.5 %. Продемонстрирована возможность дальнейшего сокращения длительности УКИ при использовании высококонцентрированных кристаллов, так импульсы длительностью 114 фс со средней выходной мощностью 5 Вт при частоте следования 70 МГц получены при увеличении концентрации ионов Yb^{3+} до 10 ат.% для поляризации излучения $E//Nm$.



Автокорреляционная функция приведена с аппроксимацией Sech^2 функцией
Рисунок 4. – Автокорреляционная функция (слева) и спектр импульсов (справа)
лазера на кристалле Yb^{3+} (5 ат.%) $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ при пропуске выходного
зеркала 20 % и поляризации $E//Nm$ в режиме ПСМ

В главе 5 диссертационной работы представлены результаты исследований выходных характеристик систем регенеративного усиления chirпированных фемтосекундных импульсов на кристаллах с ионами Yb^{3+} .

Приведено описание схемы экспериментальной установки для исследования регенеративного усиления chirпированных УКИ (рисунок 5). Импульсы излучения задающего генератора, следующие с частотой около 70 МГц, направлялись в селектор импульсов на кристалле BBO . Отселектированные импульсы (с частотой до 200 кГц) поступали в стретчер, собранный по схеме Мартинеса на одной дифракционной решетке с периодом 1800 мм^{-1} . Стретчер вносил положительную ДГС и УКИ длительно-

стью 100–200 фс растягивался до 100–150 пс. Количество проходов импульса по резонатору управлялось длительностью высоковольтного импульса, поданного на ячейку Поккельса.

Завершающим блоком является компрессор лазерных импульсов. Компрессор создает ДГС противоположного знака по отношению к стретчеру, тем самым уменьшая длительность усиленного импульса посредством компенсации chirpa, созданного стретчером и резонатором усилителя. Компрессор собран по схеме Трейси (*Treasy*) на основе двух дифракционных решеток с периодом 1800 мм^{-1} . Пропускание компрессора составляло около 76 %.

Схема накачки активной среды усилителя организована аналогично экспериментальным установкам для исследования режимов непрерывной генерации и ПСМ.

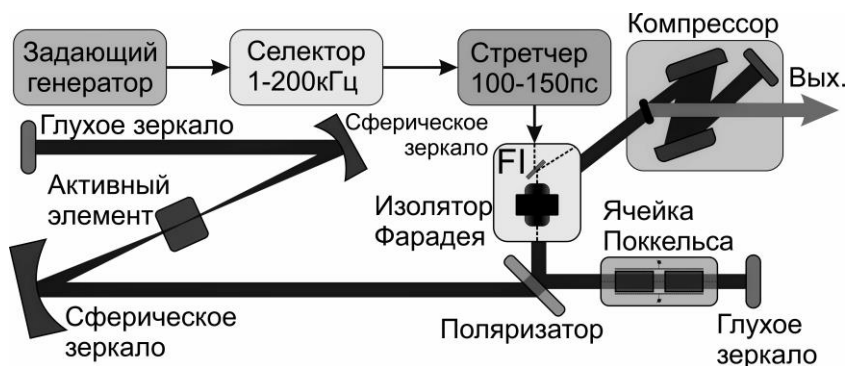


Рисунок 5. – Схема экспериментальной установки для исследования регенеративного усиления chirпированных лазерных импульсов

В **разделах 5.1–5.4** приведены результаты исследования выходных характеристик систем регенеративного усиления chirпированных УКИ на кристаллах с ионами Yb^{3+} (таблица 1).

Результаты приведены для максимальной частоты следования импульсов, обеспечиваемой экспериментальной установкой – 200 кГц. Получены средние выходные мощности от 2.8 до 6.8 Вт, длительности импульса от 165 до 633 фс и пиковые мощности импульса до 136 МВт. Практически во всех случаях наблюдалось сильное влияние эффекта сужения спектра импульса (ССИ). Минимальное ССИ наблюдалось для сред с широкими и гладкими спектрами усиления ($\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ и $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$), а минимальные длительности усиленных импульсов находились на уровне 200 фс. Данные среды из-за низких значений поперечных сечений СИ требовали для эффективного усиления большого числа проходов импульса через резонатор – более 160.

Таблица 1. – Результаты исследования регенеративного усиления УКИ

P_{CP} , Вт	N_{RT}	$E_{\text{имп}}$, мкДж	$\tau_{\text{имп}}$, фс	η , %	$P_{\text{пик}}$, МВт
$\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$, π -поляризация					
2.8	164	13.8	203	12	68
$\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$, σ -поляризация					
4	108	20	300	17.4	66.7
$\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, π -поляризация					
4.2	164	21	200	15.8	105
$\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$, $E//b$ -поляризация					
5.0	122	25	565	21.3	44.2
$\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$, $E//c$ -поляризация					
4.5	122	22.5	165	19	136.4
$\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $E//Nm$ -поляризация					
5.9	31	29.3	296	20	99
$\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $E//Np$ -поляризация					
6.8	45	33.8	633	24.3	53.4

Примечание – Обозначения: P_{CP} – средняя выходная мощность, Вт; N_{RT} – число проходов импульса по резонатору усилителя; $E_{\text{имп}}$ – энергия усиленного импульса, мкДж; $\tau_{\text{имп}}$ – длительность усиленного импульса, фс; η – оптическая эффективность системы усиления, %; $P_{\text{пик}}$ – пиковая мощность импульса, МВт.

Кристалл $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ с иттербием Yb^{3+} , имеющий высокие значения поперечных сечений СИ, обеспечивал эффективное усиление, высокую среднюю мощность и эффективность при значительно меньшем числе проходов. Однако сильное влияние эффекта ССИ приводило к увеличению длительности усиленных импульсов на выходе из компрессора. Наиболее короткие импульсы длительностью 165 фс получены в усилителе на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризации $E//c$. В данном случае форма спектра сечений стимулированного излучения состоящая из минимума и окружающих его максимумов и положение спектра импульсов задающего лазера вблизи описанного минимума приводили к дискриминации центральных и эффективному усилению периферических спектральных компонент chirпированного импульса. А в случае $E//b$ поляризации наблюдалось сильное влияние эффекта ССИ и результирующая длительность усиленных импульсов увеличивалась до 565 фс.

Спектры импульсов задающего генератора, усиленных импульсов и спектры поперечных сечений СИ кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризаций

$E//b$ и $E//c$, а также автокорреляционная функция импульсов длительностью 165 фс (поляризация $E//c$) представлены на рисунке 6.

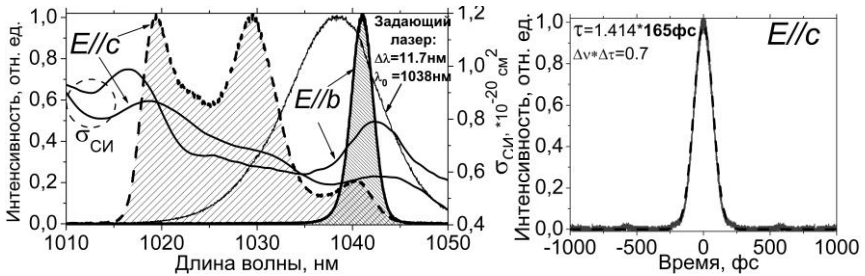


Рисунок 6. – Спектры импульсов задающего генератора, усиленных импульсов и спектры поперечных сечений СИ кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризаций $E//b$ и $E//c$, а также автокорреляционная функция импульсов длительностью 165 фс

Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, а поведение спектров усиленных импульсов обусловлено особенностями соответствующих спектров поперечных сечений СИ и относительным положением максимумов в спектре поперечных сечений СИ и спектра импульсов задающего генератора.

В случае поляризации $E//c$ (рисунок 7) изменение центральной длины волны излучения задающего генератора в диапазоне 1033–1050 нм не приводило к значительным изменениям в ширине спектра усиленных импульсов (11.3–14 нм) при исходной спектральной полуширине импульсов задающего генератора 11.7 нм. Сокращение спектральной полуширины усиленных импульсов наблюдалось при смещении спектра импульсов задающего генератора в область короче 1033 нм.

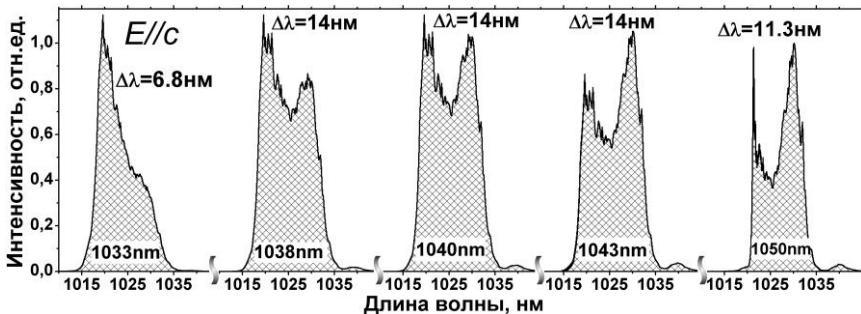


Рисунок 7. – Спектры усиленных импульсов, полученные при моделировании регенеративного усиления на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ ($E//c$) для различных центральных длин волн излучения задающего генератора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Уточнены спектроскопические характеристики кристаллов вольфраматов ($KY(WO_4)_2$, $KGd(WO_4)_2$), ванадатов (YVO_4) и алюминатов ($CaYAlO_4$), легированных трехвалентными ионами иттербия Yb^{3+} , определяющие перспективность создания активных лазерных сред в спектральной области около 1 мкм на основе описанных материалов. Измерены спектры поглощения в поляризованном свете, с использованием которых и данных об абсолютных концентрациях ионов Yb^{3+} определены спектры поперечных сечений поглощения. Проведены оценки радиационного времени жизни возбужденного состояния $^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} в указанных кристаллах путем измерения кинетик затухания люминесценции в образцах с различной концентрацией активных центров с учетом перепоглощения излучения люминесценции и рассчитаны спектры поперечных сечений СИ.

Для верификации полученных спектроскопических характеристик и оценки возможности использования исследуемых материалов в качестве активных сред лазеров с высоким уровнем выходной мощности проведено математическое моделирование режима непрерывной генерации лазера. Верификация полученных результатов проводилась путем измерения выходных параметров лазеров и сравнения расчетных и экспериментальных значений. Полученные выходные характеристики и их соответствие результатам расчетов показали возможность создания лазерных систем с высокой средней мощностью и эффективностью генерации на основе исследованных материалов с ионами Yb^{3+} , а также адекватность полученных спектроскопических характеристик [2, 3, 5, 7, 8, 10, 13, 14, 17, 22–33].

2. Реализованы лазеры на кристаллах $Yb^{3+}(5 \text{ ат.}\%):KGd(WO_4)_2$ и $Yb^{3+}(10 \text{ ат.}\%):KY(WO_4)_2$, работающие в режиме непрерывной генерации и получены максимальные выходные мощности до 9.5 и 11.0 Вт на длинах волн 1039.4 и 1040.5 нм с оптическими эффективностями 35.6 и 41.4 %, соответственно. Продемонстрирована перестройка длины волны генерации лазера на кристалле $Yb^{3+}(5 \text{ ат.}\%):KGd(WO_4)_2$, $E//Nm$ в диапазоне 58 нм (1000–1058 нм) и показано, что увеличение концентрации ионов Yb^{3+} до 10 ат.% ($Yb^{3+}(10 \text{ ат.}\%):KY(WO_4)_2$) приводит к увеличению диапазона перестройки длины волны до 70 нм (1006–1076 нм) при постоянных активных потерях лазера.

Проведен анализ параметров активных сред с точки зрения разработки фемтосекундных лазеров с высокой средней выходной мощностью и эффективностью генерации. На основе сформулированных требований были изготовлены активные элементы и получен режим пассивной синхронизации мод в лазере на кристалле $Yb^{3+}(5 \text{ ат.}\%):KGd(WO_4)_2$ для поляризации $E//Nm$

с рекордным сочетанием выходных параметров: средняя мощность 8.8 Вт, длительность спектрально-ограниченного импульса 162 фс, оптическая эффективность 37.5 % на длине волны около 1026 нм. Также продемонстрирована возможность дальнейшего сокращения длительности спектрально-ограниченного импульса при использовании высококонцентрированных кристаллов, так длительность импульса 114 фс и средняя выходная мощность 5 Вт с оптической эффективностью 37 % при частоте следования 70 МГц получены в лазере на кристалле $\text{Yb}^{3+}(10 \text{ ат.}\%):\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ для поляризации излучения $E//Nm$ на длине волны около 1033 нм.

В регенеративном усилителе на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ наилучшие результаты продемонстрированы для поляризации излучения $E//Nm$. Получена максимальная выходная мощность 7.2 Вт частота следования импульсов составляла при этом 200 кГц, а длительность импульсов 432 фс на центральной длине волны около 1027 нм. Также показано, что максимальная пиковая мощность выходных импульсов не совпадает с максимальной средней выходной мощностью, что обусловлено существенным сужением спектра усиленного импульса при увеличении числа проходов через резонатор усилителя. Так, максимальная пиковая мощность одиночного импульса получена при средней выходной мощности 5.9 Вт, при этом длительность импульса составила 296 фс [1–4, 6, 11–15, 17, 21–23, 26].

3. Реализован лазер на кристалле $\text{Yb}^{3+}(2 \text{ ат.}\%):\text{YVO}_4$, работающий в непрерывном режиме генерации и получена максимальная выходная мощность 6.3 Вт на длине волны около 1016 нм с оптической эффективностью 26.6% для π -поляризации излучения. Получена перестройка длины волны генерации лазера в диапазоне 61 нм (989–1050 нм). Впервые реализован лазер, работающий в режиме ПСМ, на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ для σ -поляризации, имеющей коротковолновый сдвиг спектра сечений СИ, и получены импульсы длительностью 175 фс со средней мощностью 0.63 Вт на длине волны около 1008 нм.

Установлено, что в случае использования кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ в качестве активного элемента для фемтосекундных лазеров с высоким уровнем выходной мощности, ограничение вносит высокое значение нелинейного показателя преломления n_2 , приводящее к значительному негативному влиянию эффекта ФСМ на параметры фемтосекундного импульса и стабильность режима ПСМ.

Впервые создан регенеративный усилитель chirпированных фемтосекундных импульсов на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ и получены импульсы длительностью 200 фс со средней мощностью 4.2 Вт при частоте следования 200 кГц на длине волны около 1018 нм [5, 16, 17, 24, 25].

4. Реализован лазер на кристалле $\text{Yb}^{3+}(3.5 \text{ ат.}\%):\text{CaYAlO}_4$, работающий в непрерывном режиме генерации и получена максимальная выходная

мощность 7.4 Вт на длине волны 1044 нм с оптической эффективностью 29.9 % для σ -поляризации излучения.

Создан лазер на кристалле Yb^{3+} (3.5 ат.%): CaYAlO_4 , работающий в режиме ПСМ и получены импульсы длительностью 145 фс со средней мощностью 1.2 Вт на длине волны около 1040 нм для σ -поляризации. Установлено, что низкие значения поперечных сечений СИ кристалла Yb^{3+} : CaYAlO_4 приводят к большему значению энергии насыщения усиления и к более высокому значению пороговой внутррезонаторной энергии импульса лазера, работающего в режиме ПСМ. Предшествующий переходной режим модуляции добротности с синхронизацией мод резонатора приводит к нестабильному старту режима непрерывной ПСМ и увеличивает вероятность разрушения оптических элементов резонатора. Данное поведение наблюдалось при проведении экспериментов с π -поляризацией генерируемого излучения, а также для σ -поляризации излучения с пропуском выходных зеркал более 5 %.

Впервые реализован регенеративный усилитель на кристалле Yb^{3+} : CaYAlO_4 с минимальным сужением спектра усиленного импульса для π -поляризации и получены импульсы длительностью 203 фс со средней мощностью около 2.8 Вт и центральной длиной волны 1032 нм для π -поляризации и импульсы длительностью 300 фс со средней мощностью 4 Вт и центральной длиной волны около 1037 нм для σ -поляризации при частоте следования 200 кГц [7, 10, 17, 20, 27, 29, 30].

5. Впервые определены спектроскопические характеристики и получена генерация лазерного излучения в режимах непрерывной генерации и ПСМ, а также продемонстрирован регенеративный усилитель чирпированных УКИ на кристалле Yb^{3+} : LuAlO_3 . Получены выходные мощности до 9.6 Вт (на длине волны около 1041 нм), дифференциальные эффективности генерации до 84.5 %, оптические эффективности до 39 % в режиме непрерывной генерации. Реализована перестройка длины волны генерации лазера в диапазоне 82 нм (987–1069 нм) для поляризации излучения $E//c$.

Созданы лазеры с ПСМ при использовании в качестве активной среды кристалла Yb^{3+} : LuAlO_3 и получены фемтосекундные импульсы на центральных длинах волн в диапазоне 999–1041 нм. Импульсы длительностью 130 фс со средней выходной мощностью 7 Вт и оптической эффективностью генерации 28.1 % получены для $E//b$ поляризации на центральной длине волны около 1017 нм при частоте следования импульсов 70 МГц. Соответствующие энергия импульса 100 нДж и пиковая мощность более 0.75 МВт. Наибольшая средняя выходная мощность 7.8 Вт, длительность импульса 840 фс, оптическая эффективность генерации 31 % получены для поляризации $E//c$ на центральной длине волны около 999 нм при накачке в области 980 нм.

Впервые продемонстрировано эффективное усиление широкополосных chirпированных фемтосекундных импульсов, за счет использования формы спектра поперечных сечений СИ активной среды ($\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$, $E//c$) как амплитудного фильтра, обеспечивающего короткую длительность усиленных импульсов за счет дискриминации центральных и эффективного усиления периферических спектральных компонент импульса. Получены импульсы длительностью 165 фс со средней мощностью 4.5 Вт и оптической эффективностью 19 % при частоте следования 200 кГц в спектральной области около 1025 нм для $E//c$ поляризации. При частоте следования импульсов 10 кГц получены импульсы длительностью 192 фс с энергией 133 мкДж, пиковой мощностью более 690 МВт на центральной длине волны 1025 нм. Импульсы длительностью 565 фс со средней мощностью 5 Вт и оптической эффективностью 21.3 % при частоте следования 200 кГц получены для $E//b$ поляризации в спектральной области около 1041 нм.

Проведено математическое моделирование процесса усиления широкополосных chirпированных фемтосекундных импульсов на основе уравнения распространения импульса с целью оценки степени влияния положения спектра импульса задающего генератора на результирующий спектр усиленных импульсов. Показано, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, а поведение спектров усиленных импульсов для поляризаций $E//b$ и $E//c$ обусловлено особенностями соответствующих спектров поперечных сечений СИ и относительным положением максимумов в спектре поперечных сечений СИ и спектра импульсов задающего генератора. При изменении центральной длины волны излучения задающего генератора в диапазоне 1038–1050 нм в регенеративном усилителе на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ для поляризации $E//b$ наблюдалось сужение спектра усиленных импульсов до 1.6–2.5 нм, а для поляризации $E//c$ спектральная полуширина усиленных импульсов находилась в пределах 11.3–14 нм при исходной спектральной полуширине 11.7 нм [8, 9, 17–19, 28, 31–33].

6. Предложена оригинальная схема осевой продольной накачки, обеспечивающая спектральную и поляризационную независимость пучка накачки и моды резонатора лазера, что позволило реализовать перестройку длины волны генерации лазера в непрерывном режиме с рекордно малым Стоксовым сдвигом на основе материалов с ионами Yb^{3+} , исследованных в данной работе. Например, при использовании кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ получена перестройка длины волны генерации в диапазоне более 100 нм от 982 до 1086 нм при накачке в области 980 нм [3–5, 7–10, 16–20, 24–33].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическая значимость результатов, полученных при выполнении диссертационного исследования заключается в создании систем генерации и уси-

ления фемтосекундных лазерных импульсов с высокой средней выходной мощностью, высокой эффективностью и короткой длительностью импульса, излучающих в области около 1 мкм, с продольной диодной накачкой.

Использование кристаллов алюмината (LuAlO_3) и вольфраматов ($\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$), активированных ионами Yb^{3+} открывает новые возможности по разработке и коммерциализации эффективных систем генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов для различных практических приложений.

Созданные при выполнении работы экспериментальные установки и макеты лазеров и регенеративных усилителей УКИ являются основой для дальнейших исследований данного направления, проводимых сотрудниками НИЦ оптических материалов и технологий БНТУ.

Полученные результаты представляют интерес для НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, ОАО «Пеленг», ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси» и могут применяться при разработке систем генерации и усиления ультракоротких лазерных импульсов с накачкой полупроводниковыми лазерными диодами, работающих как в области спектра около 1 мкм, так и в других спектральных диапазонах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Руденков, А.С. Система регенеративного усиления фемтосекундных лазерных импульсов на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ с диодной накачкой / А.С. Руденков, В.Э. Кисель, А.Е. Гулевич, Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2012. – №2 (5). – С. 15–19.
2. Kisel, V.E. Highly efficient 12 W diode-pumped actively Q-switched $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // Opt. Lett. – 2014. – Vol. 39. – P. 3038–3041.
3. Kisel, V.E. High-power, efficient, semiconductor saturable absorber mode-locked $\text{Yb}:\text{KGW}$ bulk laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, A.A. Pavlyuk, A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, N.N. Rubtsova, B.R. Semyagin, N.V. Kuleshov // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40. – P. 2707–2710.
4. Kovalyov, A.A. Efficient high-power femtosecond $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser / A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, N.N. Rubtsova, B.R. Semyagin, V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // Laser Phys. Lett. – 2015. – Vol. 12. – P. 75801–75805.
5. Rudenkov, A. 200 kHz 5.5 W $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ -based chirped-pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, V. Matrosov, N. Kuleshov // Opt. Lett. – 2015. – Vol. 40. – P. 3352–3355.
6. Rubtsova, N.N. Fast mirrors for femtosecond passive mode-locked near-infrared lasers / N.N. Rubtsova, G.M. Borisov, D.V. Ledovskikh, A.A. Kovalyov, V.V. Preobrazhenskii, M.A. Putyato, B.R. Semyagin, V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // Laser Phys. – 2016. – Vol. 26. – P. 125001–125006.
7. Rudenkov, A. $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ -based chirped pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 2249–2252.
8. Rudenkov, A. Spectroscopy and continuous wave laser performance of $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ crystal / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 5805–5808.
9. Rudenkov, A. $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ crystal as a gain medium for efficient broadband chirped pulse regenerative amplification / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Opt. Lett. – 2017. – Vol. 42. – P. 2415–2418.
10. Rudenkov, A.S. $\text{Yb}:\text{CALYO}$ -based femtosecond chirped pulse regenerative amplifier for temporally resolved pump-probe spectroscopy / A.S. Rudenkov, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, K.L. Hovhannesian, A.G. Petrosyan, N.V. Kuleshov // Devices and Methods of Measurements - 2018. - Vol. 9(3). – P. 205–214.

Статьи в сборниках материалов конференций

11. Багаев, С.Н. Новые лазерные кристаллы / С.Н. Багаев, В.А. Орлович, Н.В. Кулешов, А.А. Павлюк, В.И. Дашкевич, С.М. Ватник, В.Э. Кисель, П.А. Лойко, К.В. Юмашев, А.С. Ясюкевич, К.Н. Горбаченя, А.С. Руденков // *Материалы Второй Международной научно-практической конференции «Наука - инновационному развитию общества»*, Минск, «Беларуская думка», 2014 г., С. 17–29.

12. Руденков, А.С. Исследование влияния параметров пассивного затвора на выходные характеристики фемтосекундного Yb:KYW лазера / А.С. Руденков, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов // *Материалы 6-й Международной научно-технической конференции Приборостроение 2013*, Минск, 20–22 ноября 2013 г. / *Белорусский национальный технический университет*; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2013. – С. 349.

13. Kisel, V.E. Diode-pumped actively Q-switched Yb:KGd(WO₄)₂ laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, D.A. Homan, N.V. Kondrtyuk, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // *9й Белорусско-Российский семинар «ПЛиС»* – 28–31 Мая 2013 г. – Минск, 2013. – P. 71–72.

14. Rudenkov, A.S. High efficient 12W diode-pumped actively Q-switched Yb:KGd(WO₄)₂ laser / A.S. Rudenkov, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // *Photonics: Science into production – Proceedings of Belarus-China Forum, Belarusian National Technical University, 12–13 December 2013 – Minsk, 2013. – P. 63–68.*

15. Руденков, А.С. Разработка фемтосекундного лазера, излучающего в области длин волн окло 1 мкм с длительностью импульса менее 100 фс / А.С. Руденков, В.Э. Кисель, М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.М. Ивашко, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов // *Материалы 7-й Международной научно-технической конференции Приборостроение 2014*, Минск, 19–21 ноября 2014 г. / *Белорусский национальный технический университет*; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2014. – С. 366–367.

16. Rudenkov, A. Yb³⁺:YVO₄ chirped pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, V. Matrosov, N. Tolstik, N. Kuleshov // *Материалы 8-й Международной научно-технической конференции в 2 томах, Том 2, Приборостроение 2015*, Минск, 25–27 ноября 2015 г. / *Белорусский национальный технический университет*; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2015. – С. 127–129.

17. Kisel, V. Yb-doped crystals for ultrafast lasers and chirped-pulse regenerative amplifiers / V. Kisel, A. Rudenkov, N. Kuleshov // *Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT)*, Minsk, Belarus, September 26–30, 2016. – P. 523–524.

18. Rudenkov, A. Gain narrowing free operation of chirped pulse regenerative amplifier based on Yb:LuAlO₃ crystal / A. Rudenkov, V. Kisel,

A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Proceedings of the 9th international Scientific and Technical Conference “Instrumentation engineering-2016”, Minsk, 23–25 November 2016. – P. 240–241.

19. Kisel, V. Efficient diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ chirped pulse regenerative amplifier / V. Kisel, A. Rudenkov, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Book of Papers of the 11th Belarusian-Russian Workshop “Semiconductor lasers and system // ed. I.V. Dulevich, G.P. Yablonskii, 22–26 May 2017, Minsk, Belarus. – P. 44–47.

20. Rudenkov, A. $\text{Yb}:\text{CALYO}$ based broad-band seeded chirped pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Материалы 10-й Международной научно-технической конференции, Приборостроение 2017, Минск, 01–03 ноября 2017 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2017. – С. 332–333.

Тезисы докладов конференций

21. Кисель, В.Э. $\text{Yb}:\text{KGW}$ Регенеративный усилитель фемтосекундных лазерных импульсов с диодной накачкой / В.Э. Кисель, А.С. Руденков, А.Е. Гулевич, Н.В. Кулешов // Лазерная физика и оптические технологии: сборник тезисов 9-й международной научной конференции, Гродно, 30 мая–2 июня 2012 г. / Гродненский государственный университет им. Я. Купалы. – Гродно, 2012. – С. 12.

22. Kisel, V.E. 12 W efficient air cooled diode-pumped actively Q-switched $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov // IV Конгресс физиков Беларуси: Белорусско-Шведско-Украинский семинар, 24–26 апреля 2013 г. – Минск, 2013. / Сборник научных трудов. / редкол.: С.Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2013. – С. 426–427.

23. Kisel, V.E. 12W efficient air cooled diode-pumped actively Q-switched $\text{Yb}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ laser / V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, A.E. Gulevich, N.V. Kondrtyuk, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk // Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/EUROPE-IQEC), Munich, Germany, 12–16 May 2013 / European Physical Society; David Burns, eds. – Mulhouse, 2013. – 1 p.

24. Rudenkov, A. $\text{Yb}:\text{YVO}_4$ -based regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, V. Matrosov, N. Kuleshov // Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe (CLEO/EUROPE-EQEC), Munich, Germany, 21–25 June 2015 / European Physical Society; Mauro Tonelli, eds. – Mulhouse, 2015. – 1 p.

25. Rudenkov, A. $\text{Yb}:\text{YVO}_4$ chirped pulse regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, V. Matrosov, N. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Berlin, Germany, 4–9 October, 2015 / Optical Society of America; P. Moulton, eds. [et al.] - Washington DC, 2015. – 3 p.

26. Kisel, V. High power efficient SESAM-mode-locked Yb:KGW bulk laser / V. Kisel, A. Rudenkov, A. Pavlyuk, A. Kovalyov, V. Preobrazhenskii, M. Putyato, N. Rubtsova, B. Semyagin, N. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL), Berlin, Germany, 4–9 October, 2015 / Optical Society of America; P. Moulton, eds. [et al.] - Washington DC, 2015. – 3 p.

27. Rudenkov, A. Chirped pulse regenerative amplifier based on Yb:CaYAlO₄ crystal: different orientation study / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // 7th EPS-QEOD Europhoton Conference, Vienna, Austria, 21–26 August, 2016 / European Physical Society; A. Baltuska, eds. – Mulhouse, 2016. – 1 p.

28. Kisel, V. Gain narrowing free operation of chirped pulse regenerative amplifier based on Yb:LuAlO₃ crystal / V. Kisel, A. Rudenkov, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // 7th EPS-QEOD Europhoton Conference, Vienna, Austria, 21–26 August, 2016 / European Physical Society; A. Baltuska, eds. – Mulhouse, 2016. – 1 p.

29. Rudenkov, A. Broad-band seeded chirped pulse Yb:CALYO regenerative amplifier / A. Rudenkov, V. Kisel, A. Yasukevich, K. Hovhannesian, A. Petrosyan, N. Kuleshov // Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany, 25–29 June 2017 / European Physical Society; Giulio Cerullo, eds. – Mulhouse, 2017. – 1 p.

30. Руденков, А.С. Регенеративный усилитель широкополосных лазерных импульсов на кристалле Yb³⁺:CaYAlO₄ с диодной накачкой / А.С. Руденков, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, К.Л. Ованесьян, А.Г. Петрося, Н.В. Кулешов // VI Конгресс физиков Беларуси, 20–23 ноября 2017 г. – Минск, 2017. – С. 188–189.

31. Rudenkov, A.S. Low quantum defect actively Q-switched and frequency doubled Yb³⁺:LuAlO₃ laser / A.S. Rudenkov, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, K.L. Hovhannesian, A.G. Petrosyan, N.V. Kuleshov // 18th Conference on Laser Optics, St. Petersburg, Russia, 4–8 June 2018 / Institute for Laser Physics; A.A. Mak, eds. – St. Petersburg, 2018. – 1 p.

32. Rudenkov, Alexander Compact 999.6 nm actively Q-switched Yb:LuAP laser / Alexander Rudenkov, Viktor Kisel, Anatol Yasukevich, Karine Hovhannesian, Ashot Petrosyan, Nikolai Kuleshov // 8th EPS-QEOD Europhoton Conference, Barcelona, Spain, 02–07 September, 2018 / European Physical Society; M. Ebrahim-Zadeh, eds. – Mulhouse, 2018. – 1 p.

33. Rudenkov, Alexander High power mode-locked Yb:LuAP bulk laser / Alexander Rudenkov, Viktor Kisel, Anatol Yasukevich, Karine Hovhannesian, Ashot Petrosyan, Nataliya Rubtsova, Alexey Kovalyov, Valery Preobrazhenskii, Nikolai Kuleshov // 8th EPS-QEOD Europhoton Conference, Barcelona, Spain, 02–07 September, 2018 / European Physical Society; M. Ebrahim-Zadeh, eds. – Mulhouse, 2018. – 1 p.

РЭЗІЮМЭ

Рудзенкоў Аляксандр Сяргеевіч

**СІСТЭМЫ ГЕНЕРАЦЫІ І РЭГЕНЕРАТЫЎНАГА ЎЗМАЦНЕННЯ
ФЕМТАСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ІМПУЛЬСАЎ
НА КРЫШТАЛЯХ ВАЛЬФРАМАТАЎ, ВАНАДАТАЎ
І АЛЮМІНАТАЎ З ТРОХВАЛЕНТНЫМИ ІЁНАМИ ІТЕРБІЯ**

Ключавыя словы: пасіўная сінхранізацыя мод, фемтасекундны імпульс, рэгенератыўны ўзмацняльнік, падоўжная дыёдная напампоўка.

Мэта працы: стварэнне сістэм генерацыі і ўзмацнення фемтасекундных лазерных імпульсаў, якія спалучаюць высокую сярэднюю магутнасць, кароткую працягласць імпульсу і высокую эфектыўнасць генерацыі ў спектральным дыяпазоне каля 1 мкм, на крышталях вальфраматаў, ванадатаў і алюмінатаў, актываваных іёнамі Yb^{3+} .

Метады даследавання і апаратура: праводзілася матэматычнае мадэляванне і эксперыментальнае даследаванне лазераў у рэжымах бесперапыннай генерацыі, пасіўнай сінхранізацыі мод і рэгенератыўным узмацненні чырпіраваных фемтасекундных імпульсаў. Прадметам даследавання з'яўляліся спектраскапічныя і генерацыйныя характарыстыкі крышталю $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$.

Атрыманая вынікі і іх навізна: упершыню вызначаны спектраскапічныя і генерацыйныя характарыстыкі (у рэжымах бесперапыннай генерацыі, пасіўнай сінхранізацыі мод і рэгенератыўнага ўзмацнення чырпіраваных фемтасекундных імпульсаў пры падоўжнай дыёднай напампоўцы) крышталю $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$. Упершыню прадэманстравана рэгенератыўнае ўзмацненне чырпіраваных фемтасекундных імпульсаў на крышталях $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ і $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$. Упершыню рэалізавана генерацыя фемтасекундных імпульсаў з рэкордна высокай эфектыўнасцю (больш за 37%), сярэдняй выхадной магутнасцю (больш за 8.5 Вт) і кароткай працягласцю імпульсу (менш за 170 фс) на крышталі $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. Упершыню прапанавана арыгінальная схема восевай падоўжнай напампоўкі, якая забяспечвае спектральную і палярэзацыйную незалежнасць пучка напампоўкі і моды рэзанатара лазера, што дазволіла рэалізаваць пераналадку даўжыні хвалі генерацыі лазера ў дыяпазоне больш за 100 нм пры выкарыстанні крышталю $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$.

Рекамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: вынікі даследавання ужытыя пры распрацоўцы сістэм генерацыі і ўзмацнення фемтасекундных лазерных імпульсаў.

РЕЗЮМЕ

Руденков Александр Сергеевич

**СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ И РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА КРИСТАЛЛАХ ВОЛЬФРАМАТОВ, ВАНАДАТОВ
И АЛЮМИНАТОВ С ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ**

Ключевые слова: пассивная синхронизация мод, фемтосекундный импульс, регенеративный усилитель, продольная диодная накачка.

Цель работы: создание систем генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов, сочетающих высокую среднюю мощность, короткую длительность импульса и высокую эффективность генерации в спектральном диапазоне около 1 мкм, на кристаллах вольфраматов, ванадатов и алюминатов, активированных ионами Yb^{3+} .

Методы исследования и аппаратура: проводилось математическое моделирование и экспериментальное исследование лазеров в режимах непрерывной генерации, пассивной синхронизации мод и регенеративном усилении чирпированных фемтосекундных импульсов. Предметом исследования являлись спектроскопические и генерационные характеристики кристаллов $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$.

Полученные результаты и их новизна: впервые определены спектроскопические и генерационные характеристики (в режимах непрерывной генерации, пассивной синхронизации мод и регенеративного усиления чирпированных фемтосекундных импульсов при продольной диодной накачке) кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$. Впервые продемонстрировано регенеративное усиление чирпированных фемтосекундных импульсов на кристаллах $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ и $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$. Впервые реализована генерация фемтосекундных импульсов с рекордно высокой эффективностью (более 37 %), средней выходной мощностью (более 8.5 Вт) и короткой длительностью импульса (менее 170 фс) на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$. Впервые предложена оригинальная схема осевой продольной накачки, обеспечивающая спектральную и поляризационную независимость пучка накачки и моды резонатора лазера, что позволило реализовать перестройку длины волны генерации лазера в диапазоне более 100 нм при использовании кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты исследования применены при разработке систем генерации и усиления фемтосекундных лазерных импульсов.

SUMMARY

Alexander Rudenkov

SYSTEMS OF GENERATION AND REGENERATIVE AMPLIFICATION OF FEMTOSECOND LASER PULSES BASED ON TUNGSTATE, VANADATE AND ALUMINATES CRYSTALS WITH TRIVALENT YTTERBIUM IONS

Keywords: passive mode-locking, femtosecond pulse, regenerative amplifier, longitudinal diode pumping.

The aim of this work is to create systems based on crystals doped with Yb^{3+} ions for the generation and amplification of femtosecond laser pulses that combine high average power, short pulse duration, and high optical efficiency in the spectral range around $1 \mu\text{m}$.

Research methods and equipment: mathematical modeling and experimental investigation of continuous wave and passive mode-locked lasers and chirped femtosecond pulses regenerative amplifiers were carried out. The subject of the study were spectroscopic and laser characteristics of $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$, $\text{Yb}^{3+}:\text{LuAlO}_3$ crystals.

Obtained results and novelty: spectroscopic and laser characteristics (continuous wave and passive mode-locking modes of operation and regenerative amplification of chirped femtosecond pulses with longitudinal diode pumping) of Yb^{3+} -doped lutetium aluminate crystal (LuAlO_3) were determined for the first time. Regenerative amplification of chirped femtosecond pulses based on yttrium vanadate (YVO_4) and calcium-yttrium aluminate (CaYAlO_4) crystals with Yb^{3+} ions was obtained for the first time to our knowledge. Femtosecond pulses generation with a record high efficiency (more than 37 %), an average output power more than 8.5 W and a short pulse duration (less than 170 fs) was realized on $\text{Yb}^{3+}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ crystal for the first time to our knowledge. An original axial longitudinal pumping scheme that ensures the spectral and polarization independence of the pump beam and the laser cavity mode was proposed, which allows laser wavelength tuning in the range of more than 100 nm when using the $\text{Yb}^{3+}:\text{CaYAlO}_4$ crystal.

Recommendation for use and application area: obtained results are applied in the development of systems for generating and amplification of femtosecond laser pulses.

Научное издание

РУДЕНКОВ
Александр Сергеевич

СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ И РЕГЕНЕРАТИВНОГО УСИЛЕНИЯ
ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ
НА КРИСТАЛЛАХ ВОЛЬФРАМАТОВ, ВАНАДАТОВ
И АЛЮМИНАТОВ С ТРЕХВАЛЕНТНЫМИ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Подписано в печать 01.11.2018. Формат 60x84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризо-
графия.

Усл. печ. л. 1,57. Уч.-изд. л. 1,23. Тираж 80. Заказ 923.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный тех-
нический университет. Свидетельство о государственной регистрации из-
дателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/173 от
12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.