

(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.3.038.825.2

Горбаченя
Константин Николаевич

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ С ИОНАМИ ЭРБИЯ
В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ 1.5-1.6 МКМ ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ
НАКАЧКЕ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 - оптика

Минск, 2018

(ОЗНАКОМИТЕЛЬНЫЙ ФРАГМЕНТ)

Работа выполнена в **Белорусском национальном техническом университете.**

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Кулешов Николай Васильевич,
доктор физико-математических
наук, профессор, заведующий
кафедрой лазерной техники и
технологии Белорусского
национального технического
университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Шкадаревич Алексей Петрович,
доктор физико-математических
наук, профессор, академик НАН
Беларуси, директор
УП «НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»;

Шаронов Геннадий Викторович,
кандидат физико-математических
наук, доцент, заведующий
лабораторией обработки и передачи
информации НИУ «Институт
прикладных физических проблем
им. А.Н. Севченко».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГНУ «Институт физики им.
Б.И. Степанова НАН Беларуси».**

Защита состоится **20 декабря 2018 года** в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу *Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефон ученого секретаря 209-57-09.

Почтовый адрес: *пр-т Независимости 4, Минск, 220030.*

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «___» ноября 2018 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Лазерное излучение с длиной волны 1.5-1.6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии. В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1.5-1.6 мкм, однако, благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. Широкое распространение среди лазерных материалов получили фосфатные стекла с ионами эрбия и иттербия, обладающие необходимыми для получения эффективной лазерной генерации спектроскопическими свойствами: высоким поперечным сечением поглощения в области 1 мкм, относительно коротким временем жизни уровня $^4I_{11/2}$ и близким к единице квантовым выходом люминесценции с уровня $^4I_{13/2}$. Однако их основным недостатком является низкая теплопроводность. Поэтому поиск кристаллической активной среды, обладающей необходимыми спектроскопическими свойствами для получения эффективной лазерной генерации и имеющей высокую теплопроводность, является актуальной задачей. Альтернативным подходом является использование накачки ионов Er^{3+} непосредственно на верхний лазерный уровень $^4I_{13/2}$ (резонансной накачки), что исключает необходимость использования соактивации ионами иттербия, существенно снижает потери на перенос энергии и тепловыделение, и повышает эффективность генерации.

В данной диссертационной работе проводятся исследования спектроскопических свойств и генерационных характеристик кристаллов гадолиний-алюминиевого бората $GdAl_3(BO_3)_4$ (GdAB), соактивированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , в непрерывном режиме генерации и режиме пассивной модуляции добротности. Изучаются спектроскопические свойства кристаллов иттриевого ванадата YVO_4 , литий-лютециевого фторида $LiLuF_4$ (LLF) и калий-иттриевого вольфрамата $KY(WO_4)_2$ (KYW), активированных ионами Er^{3+} , и исследуются выходные характеристики лазеров на их основе с резонансной накачкой в области 1.5 мкм. На момент постановки задач диссертационного исследования в публикациях были представлены отдельные работы, посвященные изучению спектроскопических свойств исследуемых кристаллов. Сведений о результатах исследований генерационных характеристик кристаллов $Er,Yb:GdAB$ в непрерывном режиме работы и режиме пассивной модуляции добротности, а также о реализации непрерывного режима генерации при резонансной накачке в области 1.5 мкм при использовании кристаллов $Er:LLF$ и $Er:KYW$ на момент начала работы над диссертацией в открытых источниках не найдено.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**Связь работы с научными программами (темами)**

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в государственные программы научных исследований «Электроника и фотоника», подпрограмма «Развитие методов и технологий современной оптики и лазерной физики для использования в промышленности, медицине, сельском хозяйстве, охране окружающей среды, обороне» 2011 – 2015 г., задание 2.2.01 «Разработка новых кристаллических и стеклокристаллических активных сред и создание твердотельных лазерных систем на их основе, излучающих в видимом и ИК диапазонах спектра в режимах непрерывной генерации, модуляции добротности, генерации и усиления фемтосекундных импульсов для применения в прецизионной обработке материалов, системах наблюдения, локации и дальнометрии» (номер госрегистрации 20111355); «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника» 2016-2020 г., задание 1.1.02 «Многочастотные лазерные системы на основе новых активных сред и нелинейно-оптических преобразователей для применений в обработке материалов, в биомедицине, локации и дальнометрии, в научных исследованиях», подзадание «Твердотельные лазерные системы на основе новых активных сред для применений в обработке материалов, системах локации и дальнометрии» (номер госрегистрации 20160625); «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Нanomатериалы и нанотехнологии» 2015-2018 г., задание 2.53 «Разработка методов формирования, исследование и моделирование мультислойных тонкопленочных наногетероструктур на основе углеродных нанотрубок, графена, 2D-слоев дихалькогенидов переходных металлов, перовскитов для создания элементной базы нового поколения приборов и устройств наноэлектроники и фотоники, а именно, диодных и МДП наногетероструктур, фотоэлектронных преобразователей, газовых сенсоров, детекторов ионизирующего излучения» подзадание 3 «Исследование мультислойных тонкопленочных наногетероструктур на основе углеродных нанотрубок, графена, 2D-слоев дихалькогенидов переходных металлов и перовскитов для создания насыщающихся поглотителей для лазеров ультракоротких импульсов» (номер госрегистрации 20160636); а также в рамках проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований Ф12Р-183 «Синтез, кристаллохимические особенности и спектрально-генерационные свойства кристаллов $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, легированных ионами Yb^{3+} и Er^{3+} », 2012-2014 г. (номер госрегистрации 20122071).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011-2015 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19 апреля 2010 г. №585: разделам 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» и на 2016-2020 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. №190: раздел 6. Электроника и фотоника.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы являлась разработка новых активных кристаллических сред с ионами эрбия для твердотельных лазеров, излучающих в области 1.5-1.6 мкм, с накачкой в области 1 мкм и 1.5 мкм.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определить спектроскопические свойства кристаллов гадолиний-алюминиевого бората, соактивированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , и установить перспективность их использования для получения эффективной лазерной генерации в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм в непрерывном режиме генерации и режиме пассивной модуляции добротности;
- экспериментально реализовать эффективную лазерную генерацию в спектральной области 1.5-1.6 мкм на основе кристалла $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ в непрерывном режиме, а также в режиме пассивной модуляции добротности при непрерывной накачке излучением лазерных диодов в спектральной области около 1 мкм;
- исследовать спектроскопические свойства кристаллов иттриевого ванадата, литий-лютециевого фторида и калий-иттриевого вольфрамата, активированных ионами эрбия, и реализовать эффективную лазерную генерацию с длиной волны около 1.6 мкм в непрерывном режиме работы при резонансной накачке в области 1.5 мкм.

Объектами исследования являлись кристаллы гадолиний-алюминиевого бората $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, соактивированные ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , а также кристаллы иттриевого ванадата YVO_4 , литий-лютециевого фторида LiLuF_4 и калий-иттриевого вольфрамата $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$, активированные ионами Er^{3+} . Предметом исследования являлись спектроскопические свойства и генерационные характеристики вышеприведенных кристаллов.

Научная новизна

Научная новизна заключается в получении следующих результатов:

1. Определены спектроскопические свойства кристаллов гадолиний-алюминиевого бората, соактивированных ионами эрбия и иттербия, и впервые при их использовании в качестве активных сред получена эффективная лазерная генерация в непрерывном режиме и режиме пассивной модуляции добротности при диодной накачке.
2. Показано, что увеличение оптической силы наведенной термической линзы в кристалле $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, вырезанном перпендикулярно оптической оси кристалла, приводит к изменению длины волны и состояния поляризации выходного излучения лазера.
3. Установлено, что зависимость энергии выходных импульсов лазера на кристалле $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем на основе кристалла $\text{Co:MgAl}_2\text{O}_4$ от длины волны выходного излучения обусловлена величиной поперечного сечения поглощения на длине волны генерации в активной среде.
4. Впервые при использовании кристаллов $\text{Er}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ в качестве активных сред получена эффективная лазерная генерация в области 1.6 мкм при резонансной накачке в области 1.5 мкм и установлено влияние ап-конверсионных переходов с верхнего лазерного уровня $^4\text{I}_{13/2}$ на эффективность и порог генерации лазера при повышении концентрации ионов эрбия.

Положения, выносимые на защиту

1. Кристаллы $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ характеризуются высокими поперечными сечениями стимулированного испускания в спектральной области 1.5-1.6 мкм, эффективным переносом энергии от ионов иттербия к ионам эрбия и коротким временем жизни уровня $^4\text{I}_{11/2}$ ионов Er^{3+} , обуславливающим снижение потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов эрбия к ионам иттербия и ап-конверсионными переходами на вышележащие уровни, что в совокупности создает условия для получения лазерной генерации с высокими эффективностью и выходной мощностью в непрерывных лазерах на их основе с продольной накачкой излучением лазерных диодов с длиной волны около 980 нм.
2. Увеличение оптической силы наведенной термической линзы в активном лазерном элементе при возрастании мощности накачки в непрерывном режиме генерации приводит к изменению длины волны и состояния поляризации выходного излучения лазера на кристалле $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, вырезанном перпендикулярно оптической оси кристалла.

3. Уменьшение поперечного сечения поглощения на длине волны генерации обуславливает увеличение энергии импульсов при изменении длины волны выходного излучения с 1550 нм на 1522 нм в лазере на кристалле $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем $\text{Co:MgAl}_2\text{O}_4$.

4. Влияние ап-конверсионных переходов с верхнего лазерного уровня $^4\text{I}_{13/2}$ при повышении концентрации ионов эрбия приводит к снижению эффективности и возрастанию порога генерации в лазере на кристалле $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ с резонансной накачкой в спектральной области 1.5 мкм.

Личный вклад соискателя

Основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Соискателем выполнены исследования спектроскопических и генерационных характеристик лазерных кристаллов, интерпретация полученных результатов, формулировка основных выводов и положений, выносимых на защиту. Научным руководителем *Кулешовым Н.В.* была сформулирована общая тематика и направления исследований, проводились обсуждения методов исследования и полученных результатов. Соавтор совместных публикаций *Кисель В.Э.* оказал техническую помощь при выполнении лазерных экспериментов. Соавтор *Ясюкевич А.С.* оказывал консультационную помощь по вопросам выполнения моделирования работы лазеров. Соавторами *Мальцевым В.В.*, *Леонюком Н.И.*, *Павлюком А.А.*, *Матросовым В.Н.* и *Семашко В.В.* были выращены образцы исследуемых монокристаллов. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, которые не вошли в текст диссертации.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международная студенческая научно-техническая конференция «Новые направления развития приборостроения» (Минск, Беларусь - 2011), Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» (Минск, Беларусь - 2012, 2013, 2015), Европейская конференция по твердотельным и волоконным источникам когерентного излучения «Europhoton» (Стокгольм, Швеция – 2012; Вена, Австрия - 2016), Международная конференция «Лазерная физика и оптические технологии» (Гродно, Беларусь - 2012), Международная конференция по современным твердотельным лазерам «Advanced Solid State Lasers» (Париж, Франция - 2013; Шанхай, Китай – 2014; Берлин, Германия – 2015; Бостон, США - 2016), Международная конференция «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, Россия –

2014, 2016), Международная конференция физики оптических материалов «ICOM» (Будва, Черногория – 2015).

Результаты диссертации нашли применение в технологии выращивания кристаллов на геологическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова и НП ООО «Соликс»; внедрены в учебный процесс на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета БНТУ (имеются 3 акта о внедрении). Результаты могут быть использованы в производстве лазерных излучателей в ОАО «Пеленг» (имеется справка о возможном практическом использовании).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 30 научных работах: 10 статьях в научных журналах, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5 авторских листов), 7 статьях в сборниках материалов научных конференций и 13 публикациях в сборниках тезисов докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка, 1 приложения. Полный объем диссертационной работы составляет 131 страницу, включая 67 рисунков на 28 страницах, 17 таблиц на 7 страницах, 1 приложение на 5 страницах. Библиографический список содержит 164 наименования, включая собственные публикации автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В главе 1 проведен обзор литературы по исследованию спектроскопических свойств и генерационных характеристик ионов Er^{3+} в различных кристаллических матрицах. В разделе 1.1 показана схема энергетических уровней эрбий-иттербиевой среды, определены основные требования, предъявляемые к ней для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1.5-1.6 мкм при диодной накачке в области 1 мкм. Показаны результаты исследований спектроскопических свойств и генерационных характеристик фосфатных стекол с ионами Er^{3+} и Yb^{3+} , как получивших наиболее широкое распространение на сегодняшний день. Отмечены основные недостатки и ограничения в использовании указанной среды. В разделе 1.2 рассмотрены литературные данные по

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Определены спектры поперечных сечений поглощения кристаллов гадолиний-алюминиевого бората $\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, соактивированных ионами эрбия и иттербия, в спектральных областях 875-1050 нм и 1400-1650 нм для трех поляризаций, рассчитаны спектры стимулированного испускания в области 1.5 мкм. Проведено измерение кинетик затухания люминесценции ионов эрбия и определены времена жизни уровней $^4\text{I}_{11/2}$ и $^4\text{I}_{13/2}$. Проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия в кристаллах с различным содержанием ионов-активаторов. Показано, что кристалл $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ обладает характеристиками, необходимыми для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1.5-1.6 мкм. Результаты исследований представлены в работах [4, 5, 14].

2. При использовании кристалла $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ в качестве активной среды впервые получена лазерная генерация в непрерывном режиме. Исследованы генерационные характеристики кристаллов $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ с различной ориентацией активного элемента и различным содержанием ионов-активаторов. Максимальная выходная мощность получена для кристалла $\text{Er}(1.8 \text{ ат. \%}), \text{Yb}(15 \text{ ат. \%}): \text{GdAB}$, вырезанного вдоль оптической оси кристалла, и составила 1.75 Вт на длине волны 1550 нм при дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 30%. Результаты исследований представлены в работах [4, 8, 13, 18, 20, 25].

3. Установлена взаимосвязь изменения длины волны и состояния поляризации выходного излучения лазера на кристалле $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$, вырезанном перпендикулярно оптической оси кристалла, в непрерывном режиме генерации при увеличении мощности накачки с влиянием наведенной термической линзы, возникающей внутри активного лазерного элемента. Результаты исследований представлены в работах [4, 8, 23].

4. При использовании кристалла $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ впервые получен режим пассивной модуляции добротности. С насыщающимся поглотителем $\text{Co:MgAl}_2\text{O}_4$ получены лазерные импульсы с энергией до 44 мкДж и частотой следования 6.5 кГц. Длительность импульсов не превышала 4 нс в случае использования «монолитной» конфигурации лазера. При использовании образцов углеродных нанотрубок и графена в качестве насыщающегося поглотителя получен режим модулированной добротности с частотой следования лазерных импульсов до 0.5 МГц. Результаты исследований представлены в работах [1, 2, 9, 10, 16, 19, 27, 29, 30].

5. Определены спектроскопические характеристики кристаллов иттриевого ванадата, литий-лютециевого фторида и калий-иттриевого вольфрамата, активированных ионами Er^{3+} . Измерены спектры поглощения в поляризованном свете в спектральной области 1450-1650 нм, рассчитаны спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания. Исследована кинетика затухания люминесценции с уровня $^4\text{I}_{13/2}$ ионов Er^{3+} , проведен расчет спектров усиления исследуемых кристаллов в зависимости от коэффициента относительной инверсной населенности. Результаты исследований представлены в работах [3, 6, 7, 11, 15, 21, 28].

6. При использовании кристалла $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ впервые получена лазерная генерация в области около 1.6 мкм при резонансной накачке на длине волны 1531 нм. Достигнуты максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки 118 мВт и 53% на длине волны генерации 1609 нм. Установлено влияние ап-конверсионных переходов с верхнего лазерного уровня на эффективность и порог генерации лазера при повышении концентрации ионов эрбия. При использовании кристаллов Er:LiLuF_4 и Er:YVO_4 получена лазерная генерация в области 1.6 мкм с высокой дифференциальной эффективностью. Результаты исследований представлены в работах [3, 6, 7, 12, 17, 22, 24].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Практическое значение полученных результатов заключается в том, что предложены новые активные среды для лазеров, излучающих в спектральной области 1.5-1.6 мкм, с накачкой в области 1 мкм и 1.5 мкм. Применение кристаллов $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ делает возможным создание высокочастотного, мощного, компактного и недорогого лазерного излучателя для перспективных массовых систем оптической локации (лидаров) беспилотного транспорта. Кроме того, благодаря возможности перестройки длины волны непрерывные лазеры на кристалле Er,Yb:GdAB могут найти применение в научных исследованиях.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс на кафедре лазерной техники и технологии приборостроительного факультета БНТУ. Полученные результаты были использованы при разработке технологии выращивания кристаллов на геологическом факультете МГУ им. Ломоносова и НП ООО «Соликс», а также представляют интерес для ОАО «Пеленг» при разработке лазерных излучателей.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**Статьи в рецензируемых журналах**

1. Passively Q-switched microchip Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / V.E. Kisel, K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, A.M. Ivashko, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, N.V. Leonyuk // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, № 13. – P. 2745-2747.
2. Высокочастотный Er³⁺,Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ микрочип-лазер с продольной диодной накачкой / К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов, В.В. Мальцев, Н.И. Леонюк // Приборы и методы измерений. – 2012. – Т. 2, № 5. – С. 79-82.
3. In-band pumped room-temperature Er:KY(WO₄)₂ laser emitting near 1.6 μm / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // Laser Physics. – 2013. – Vol. 23, № 12. – P. 125005-125009.
4. High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // Optics Letters. – 2013. – Vol. 38, № 14. – P. 2446–2448.
5. Crystal growth of CW diode-pumped (Er³⁺,Yb³⁺):GdAl₃(BO₃)₄ laser material / V.V. Maltsev, E.V. Koporulina, N.I. Leonyuk, K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov // Journal of Crystal Growth. – 2014. – Vol. 401. – P. 807–812.
6. Непрерывный YVO₄:Er – лазер с резонансной накачкой / К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, В.Н. Матросов, Н.А. Толстик, Н.В. Кулешов // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 2. – С. 214 - 218.
7. Лазерная генерации на кристаллах Er:LiYF₄ и Er:LiLuF₄ с резонансной накачкой / К.Н. Горбаченя, С.В. Курильчик, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов, А.С. Низамутдинов, С.Л. Кораблева, В.В. Семашко // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 2. – С. 95–99.
8. Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, № 5. – P. 918–921.
9. Passively Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser with single-walled carbon nanotube based saturable absorber / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, M.B. Prudnikova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, S.Y. Choi, F. Rotermund, N.V. Kuleshov // Laser Physics Letters. – 2017. – Vol. 14, № 3. – P. 035802-035807.
10. Graphene Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser at 1550 nm / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, P.A. Loiko, X. Mateos,

V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, M. Aguiló, F. Díaz, U. Griebner, V. Petrov, N.V. Kuleshov // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56, № 16. – P. 4745-4749.

Статьи в сборниках трудов конференций

11. Безопасный для глаз лазер на основе кристалла Er:YVO_4 с резонансной накачкой / К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов, В.Н. Матросов // *Лазерная физика и оптические технологии: сборник материалов 9-ой международной научной конференции*, Гродно, 30 мая – 2 июня 2012 г. / Гродненский государственный университет им. Я. Купалы; редкол.: С.С. Ануфрик [и др.] – Гродно, 2012. – С. 28-30.

12. Непрерывный эрбиевый лазер с резонансной накачкой / К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов, В.Н. Матросов // *Материалы 5-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение*, Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2012. – С. 258-260.

13. Microchip Er,Yb:YAB diode-pumped laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, N.A. Tolstik, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk // *Материалы 5-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение*, Минск, 21-23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2012. – С. 260-262.

14. Spectroscopy and efficient laser operation of $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal at 1.5-1.6 μm / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // *Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение*, Минск, 20-22 ноября 2013 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2013. – С. 249-251.

15. Исследование генерационных характеристик кристалла Er:LiLuF_4 при резонансной накачке в спектральной области 1.5-1.6 мкм / М.Б. Барашкова, К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, С.В. Курильчик, Н.В. Кулешов // *Материалы 23-ой Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов Физика конденсированного состояния*, Гродно, 16 апреля 2015 г. / УО Гродненский государственный университет им. Я. Купалы; редкол.: В.К. Барсуков [и др.] – Гродно, 2015. – С. 150-152.

16. Passively Q-switched Er,Yb:GdAB diode-pumped laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, N.A. Tolstik, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk // *Материалы 8-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение*, Минск, 25-27 ноября 2015 г.: в

2 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2015. – Т. 2. – С. 47-48.

17. Исследование генерационных характеристик кристаллов $\text{Er}^{3+}:\text{LiLuF}_4$ и $\text{Er}^{3+}:\text{YLiF}_4$ при резонансной накачке в спектральной области 1.5-1.6 мкм / М.Б. Барашкова, К.Н. Горбаченя, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, В.В. Семашко, А.С. Низамутдинов, С.Л. Кораблева // Материалы 8-ой Международной научно-технической конференции, Приборостроение, Минск, 25-27 ноября 2015 г.: в 2 т. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2015. – Т. 2. – С. 11-12.

Тезисы докладов конференций

18. Горбаченя, К.Н. Непрерывный эрбиевый лазер, излучающий в области 1.5-1.6 мкм / К.Н. Горбаченя, Н.В. Кулешов, Н.А. Толстик // Новые направления развития приборостроения: материалы 4-ой международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 21-23 апреля 2011 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.] – Минск, 2011. – С. 10.

19. Passively Q-switched microchip Er,Yb:YAB diode-pumped laser / V.E. Kisel, K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, A.M. Ivashko, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk // 5th EPS-QEOD Europhoton Conference: technical digest, Stockholm, Sweden, August 26-31, 2012 / European Physical Society; F. Laurell, ed. - Mulhouse, 2012. – P. WeP. 16.

20. Efficient CW diode-pumped $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Paris, France, 27 October – 1 November 2013 / Optical Society of America; R. Moncorge, ed. - Washington DC, 2013. – P. AW1A.5.

21. In-band pumped $\text{Er:KY}(\text{WO}_4)_2$ laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Paris, France, 27 October – 1 November 2013 / Optical Society of America; R. Moncorge, ed. - Washington DC, 2013. – P. JTh2A.53.

22. Laser properties of in-band pumped $\text{Er}^{3+}:\text{YVO}_4$ and $\text{Er}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ crystals / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk, V.N. Matrosov // 16th Conference on Laser Optics : technical program, St. Petersburg, 30 June – 4 July 2014 / Institute for Laser Physics; A.A. Mak, ed. – St. Petersburg, 2014. – P. ThR1-18.

23. Laser performance of $\text{Er,Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystals with different erbium concentrations / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev,

N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Shanghai, China, 16 - 21 November, 2014 / Optical Society of America; G. Huber, ed. – Washington DC, 2014. – P. AM2A.5.

24. Efficient in-band pumped Er:KY(WO₄)₂ laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // The 4th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices, Budva, Montenegro, 31 August – 4 September, 2015 / University of Belgrade (Serbia); M. Dramićanin, ed. – Belgrade, 2015. – P. S6-O26-300.

25. CW and Q-switched diode-pumped laser operation of Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ crystal / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Berlin, Germany, 4 - 9 October, 2015 / Optical Society of America; R. Li, ed. – Washington DC, 2015. – P. ATu1A.5.

26. Er:KY(WO₄)₂ and Er:LiYF₄ crystals for eye-safe in-band pumped lasers / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, S.L. Korableva, V.V. Semashko, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Berlin, Germany, 4 - 9 October, 2015 / Optical Society of America; R. Li, ed. – Washington DC, 2015. – P. AM5A.14.

27. Passively Q-switched 1.55 μm laser performance of Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, S.V. Kurilchik, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // 17th Conference on Laser Optics : technical program, St. Petersburg, Russia, 27 June – 1 July 2016 / Institute for Laser Physics; A.A. Mak, ed. – St. Petersburg, 2016– P. TuR1-02.

28. Spectroscopy and laser performance of in-band pumped Er:LLF and Er:YLF crystals / S.V. Kurilchik, K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, N.V. Kuleshov, A.S. Nizamutdinov, S.L. Korableva, V.V. Semashko // 17th Conference on Laser Optics : technical program, St. Petersburg, Russia, 27 June – 1 July 2016 / Institute for Laser Physics; A.A. Mak, ed. – St. Petersburg, 2016.– P. TuR1-03.

29. Diode-pumped Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser passively Q-switched with a SWCNT saturable absorber / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, S.V. Kurilchik, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, S. Choi, F. Rotermund, N.V. Kuleshov // 7th EPS-QEOD Europhoton Conference: technical digest, Vienna, Austria, 21-26 August, 2016 / European Physical Society; A. Baltuska, ed. – Mulhouse, 2016. – PO 1.4.

30. Graphene Q-switched Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser at 1550 nm / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, P.A. Loiko, X. Mateos, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov, M. Aguiló, F. Díaz, U. Griebner, V. Petrov // Advanced Solid-State Lasers (ASSL): technical digest, Boston, Massachusetts, USA, 30 October - 3 November, 2016 / Optical Society of America; P. Moulton, ed. – Washington DC, 2016. – P. AM5A.22.

РЭЗЮМЭ

Гарбачэня Канстанцін Мікалаевіч

**СПЕКТРАСКАПІЧНЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ І ГЕНЕРАЦЫЙНЫЯ
ХАРАКТАРЫСТЫКІ ЛАЗЕРНЫХ КРЫШТАЛЯЎ З ІЁНАМІ ЭРБІЯ Ў
СПЕКТРАЛЬНАЙ ВОБЛАСЦІ 1.5-1.6 МКМ ПРЫ СЕЛЕКТЫЎНАЙ
НАПАМПОЎЦЫ**

Ключавыя словы: эрбій, ітэрбій, спектральна-люмінесцэнтныя ўласцівасці, лазерная генерацыя, дыёдная напампоўка, рэзанансная напампоўка, бесперапынны рэжым генерацыі, пасіўная мадуляцыя дабротнасці.

Мэта работы: распрацоўка новых актыўных асяроддзяў з іёнамі эрбія для цвёрдацельных лазераў, якія выпраменьваюць у спектральнай вобласці 1.5-1.6 мкм, з напампоўкай у вобласці 1 мкм і 1.5 мкм.

Метады даследавання: эксперыментальныя метады даследавання спектраскапічных ўласцівасцяў і генерацыйных характарыстык новых лазерных асяроддзяў.

Выкарыстаная апаратура: стандартнае спектраметрычнае і фотапрыёмнае абсталяванне; лабараторныя ўстаноўкі для макетавання цвёрдацельных лазераў.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: вызначаны спектральна-люмінесцэнтныя ўласцівасці даследаваных матэрыялаў: вызначаны спектры папярочных сячэнняў паглынання, стымуляванага выпраменьвання і ўзмацнення, даследаваны кінэтыкі люмінесцэнцыі ўзбуджаных станаў актыўных іёнаў, эфектыўнасці пераносу энергіі ад іёнаў ітэрбія да іёнаў эрбія. Пры выкарыстанні крышталя $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ва ўмовах дыёднай напампоўкі ў вобласці 1 мкм упершыню рэалізавана лазерная генерацыя і знойдзены генерацыйныя характарыстыкі ў бесперапынным рэжыме генерацыі і рэжыме пасіўнай мадуляцыі дабротнасці. Даследаваны генерацыйныя характарыстыкі крышталю Er:YVO_4 і Er:LiLuF_4 у вобласці 1.6 мкм пры рэзананснай напампоўцы ў вобласці 1.5 мкм. Пры выкарыстанні крышталю $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ ва ўмовах рэзананснай напампоўкі ўпершыню рэалізаваны бесперапынны рэжым генерацыі з высокай эфектыўнасцю генерацыі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення. Даследаваныя ў рабоце матэрыялы рэкамендуюцца для выкарыстання ў лазерным прыборабудаванні дзеля стварэння на іх аснове кампактных і эфектыўных крыніц выпраменьвання ўмоўна бяспечнага для органаў зроку спектральнага дыяпазону 1.5-1.6 мкм.

РЕЗЮМЕ

Горбаченя Константин Николаевич

**СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНЫХ КРИСТАЛЛОВ С ИОНАМИ ЭРБИЯ
В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ 1.5-1.6 МКМ ПРИ СЕЛЕКТИВНОЙ
НАКАЧКЕ**

Ключевые слова: эрбий, иттербий, спектрально-люминесцентные свойства, лазерная генерация, диодная накачка, резонансная накачка, непрерывный режим генерации, пассивная модуляция добротности.

Цель работы: разработка новых активных сред с ионами эрбия для твердотельных лазеров, излучающих в области 1.5-1.6 мкм, с накачкой в области 1 мкм и 1.5 мкм.

Методы исследования: экспериментальные методы исследования спектроскопических свойств и генерационных характеристик новых лазерных сред.

Использованная аппаратура: стандартное спектрометрическое и фотоприемное оборудование; лабораторные установки для макетирования твердотельных лазеров.

Полученные результаты и их новизна: определены спектрально-люминесцентные свойства исследованных материалов: определены спектры поперечных сечений поглощения, стимулированного испускания и усиления, исследованы кинетики люминесценции возбужденных состояний активных ионов, эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. При использовании кристалла $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ в условиях диодной накачки в области 1 мкм впервые реализована лазерная генерация и определены генерационные характеристики в непрерывном режиме и режиме пассивной модуляции добротности. Исследованы генерационные характеристики кристаллов Er:YVO_4 и Er:LiLuF_4 в области 1.6 мкм при резонансной накачке в области 1.5 мкм. При использовании кристалла $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ в условиях резонансной накачки впервые реализован непрерывный режим работы лазера с высокой эффективностью генерации.

Рекомендации по использованию и область применения. Полученные результаты используются в научных и производственных организациях Республики Беларусь и внедрены в учебный процесс. Исследованные в работе материалы рекомендуются для применения в лазерном приборостроении для создания на их основе компактных и эффективных источников условно безопасного для органов зрения спектрального диапазона 1.5-1.6 мкм.

SUMMARY

Gorbachenya Konstantin Nikolaevich

SPECTROSCOPIC PROPERTIES AND LASER CHARACTERISTICS OF ACTIVE MEDIA WITH ERBIUM IONS IN THE SPECTRAL RANGE OF 1.5-1.6 μm UNDER SELECTIVE PUMPING

Keywords: erbium, ytterbium, spectral-luminescent properties, laser operation, diode pumping, in-band pumping, continuous-wave mode, passive Q-switching.

The purpose of the research: the development of novel active media doped with erbium ions for solid-state lasers emitting in the spectral range of 1.5-1.6 μm under pumping at near 1 μm and 1.5 μm .

Methods of investigation: the experimental investigation methods of spectroscopic properties and laser characteristics of new active media.

Used equipment: standart spectrometric and photodetector equipment; lab setups for the prototyping of solid-state lasers.

Obtained results and their novelty: the spectral-luminescent properties of investigated materials: absorption, emission and gain cross-section spectra, luminescence kinetics of active ions excited states, energy transfer efficiencies from ytterbium to erbium ions were determined. The continuous-wave and passive Q-switched laser operation of $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal was demonstrated under diode-pumping at near 1 μm for the first time to our knowledge, laser characteristics of $\text{Er,Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal were investigated. The in-band pumped laser operation of Er:YVO_4 and Er: Er:LiLuF_4 crystals at near 1.6 μm was studied. The high efficient in-band pumped continuous-wave $\text{Er:KY(WO}_4)_2$ laser was demonstrated for the first time to our knowledge.

Recommendations for usage and field of applications: The results of this research are used in the scientific and industrial organizations of the Republic of Belarus and have been implemented in the university studying courses. The investigated materials are recommended for application in laser instrument engineering as active media of compact and efficient eye-safe 1.5-1.6 μm laser sources.