

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

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 дальномерии, системах оптической локации и лазерно-искровой эмиссионной спектрометрии. 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 дальномерии» (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 дальномерии, в научных исследованиях», подзадание «Твердотельные лазерные системы на основе новых активных сред для применений в обработке материалов, системах локации и дальномерии» (номер госрегистрации 20160625); «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноматериалы 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 устройствnanoэлектронники 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  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ », 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  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  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  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , а также кристаллы иттриевого ванадата  $\text{YVO}_4$ , литий-лютециевого фторида  $\text{LiLuF}_4$  и калий-иттриевого вольфрамата  $\text{KY(WO}_4)_2$ , активированные ионами  $\text{Er}^{3+}$ . 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем на основе кристалла  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  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  $\text{Er}^{3+}$ , 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , 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 Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

4. Влияние ап-конверсионных переходов с верхнего лазерного уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> при повышении концентрации ионов эрбия приводит к снижению эффективности и возрастанию порога генерации в лазере на кристалле Er:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 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 Ясюевич 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  $\text{Er}^{3+}$  в различных кристаллических матрицах. В разделе 1.1 показана схема энергетических уровней эрбий-иттербийовой 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  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$ , 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

спектроскопическим свойствам и генерационным характеристикам лазерных кристаллов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. Показано, что кристаллы боратов удовлетворяют сформулированным в разделе 1.1 требованиям для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1.5-1.6 мкм, а также имеют высокое значение теплопроводности для получения высоких средних выходных мощностей в непрерывном режиме и режиме пассивной модуляции добротности. Раздел 1.3 посвящен поиску возможности повышения эффективности лазерной генерации в спектральной области 1.5-1.6 мкм. Как видно из приведенного анализа литературы, использование резонансной накачки в области 1.5 мкм для эрбийевых сред обеспечивает возможность повышения указанной величины до ~ 60%. Однако задача поиска новых кристаллических эрбийевых сред, подходящих для применения их в качестве активных сред лазеров с резонансной накачкой в области 1.5 мкм, до сих пор недостаточно исследована.

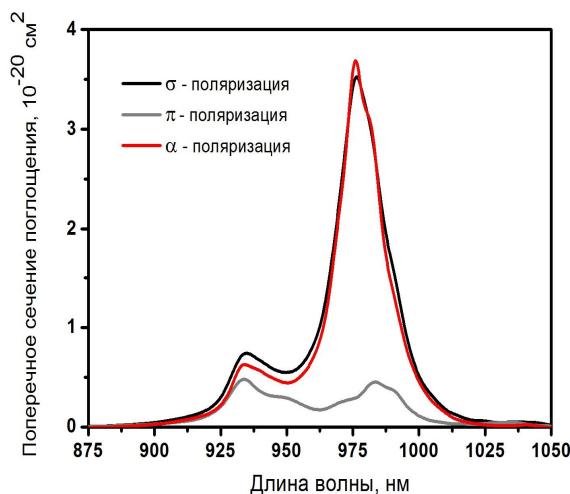
**В главе 2** приведены структурные и физические свойства объектов исследования, представлены методики, установки и аппаратура, используемые при выполнении экспериментов. Показано, что используемые методики и оборудование обеспечивают возможность решения основных задач диссертационной работы.

**В главе 3** представлены результаты исследований спектроскопических свойств и генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Er,Yb:GdAB). В разделе 3.1 приведены результаты исследований спектров поперечных сечений поглощения в спектральных областях 875-1050 нм и 1400-1650 нм и спектров люминесценции в спектральной области 1450-1650 нм в поляризованном свете. Спектральная ширина полосы поглощения в области 1 мкм составляет 18 нм, максимальное значение поперечного сечения поглощения составляет  $3.7 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 976 нм и соответствует α-поляризации (рисунок 1). Из-за сильной анизотропии поглощения в кристалле максимальное значение поперечного сечения поглощения для π-поляризации не превышает  $0.5 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup> на длине волны 935 нм.

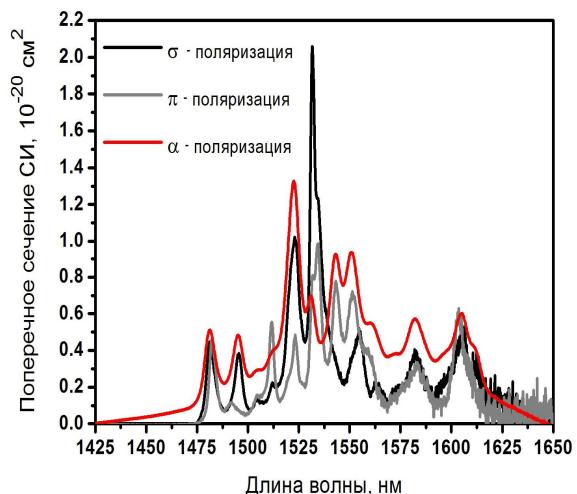
Раздел 3.2 посвящен изучению времен жизни возбужденных состояний <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> и <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов эрбия в кристалле GdAB и эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Время жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> ионов эрбия по измерениям кинетики люминесценции составило  $350 \pm 10$  мкс, время жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub>, оценка которого проводилась по разгоранию сигнала люминесценции в области около 1.5 мкм, не превышало 150 нс. Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия оценивалась для трех образцов с различной концентрацией ионов-активаторов по сокращению времени жизни ионов иттербия при соактивации кристаллов ионами эрбия. Максимальная эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам

эрбия составила 92% для кристалла с содержанием ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  1.8 ат.% и 15 ат.%, соответственно.

В разделе 3.3 выполнен расчет спектров поперечных сечений стимулированного испускания (рисунок 2). Расчет выполнялся по модифицированному методу соответствия при использовании рассчитанных ранее спектров поперечных сечений поглощения для трех поляризаций ( $\sigma$ ,  $\pi$ ,  $\alpha$ ) и радиационного времени жизни уровня  $^4\text{I}_{13/2}$  ионов эрбия. Наиболее интенсивный максимум с поперечным сечением стимулированного испускания  $2.1 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  наблюдается на длине волны 1531 нм для  $\sigma$ -поляризации.



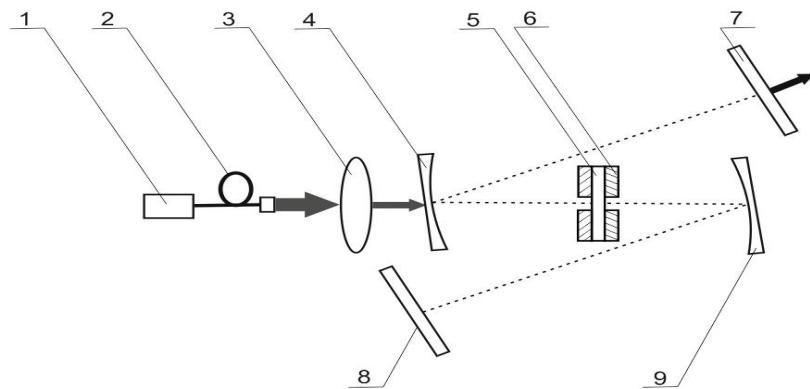
**Рисунок 1. – Спектры поперечных сечений поглощения кристалла  $\text{Er},\text{Yb:GdAB}$**



**Рисунок 2. - Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристалла  $\text{Er},\text{Yb:GdAB}$**

В разделе 3.4 приведены результаты исследований генерационных характеристик кристаллов  $\text{Er},\text{Yb:GdAB}$  в различных режимах генерации. Подраздел 3.4.1 посвящен экспериментам по исследованию генерационных характеристик кристаллов  $\text{Er},\text{Yb:GdAB}$  в непрерывном режиме. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 3. В качестве источника накачки использовался InGaAs лазерный диод с волоконным выводом излучения, излучающий на длине волны около 980 нм с максимальной выходной мощностью 7 Вт. В качестве активного элемента использовался кристалл  $\text{Er}(1 \text{ ат.}\%),\text{Yb}(8 \text{ ат.}\%):\text{GdAB}$  толщиной 1.5 мм, вырезанный перпендикулярно оптической оси кристалла, что в дальнейшем обеспечивало возможность получения излучения генерации как с  $\sigma$ -, так и с  $\pi$ -поляризацией.

Генерационные характеристики кристалла  $\text{Er},\text{Yb:GdAB}$ , вырезанного перпендикулярно оптической оси кристалла, в непрерывном режиме работы представлены в таблице 1.



- 1) лазерный диод; 2) оптическое волокно; 3) система фокусировки; 4) входное зеркало;  
5) активный элемент; 6) медный теплоотвод; 7) выходное зеркало;  
8), 9) высокоотражающие зеркала

**Рисунок 3. - Схема лабораторной установки для исследования генерационных характеристик кристалла Er,Yb:GdAB в непрерывном режиме**

Таблица 1. – Результаты лазерных экспериментов с кристаллом Er,Yb:GdAB, вырезанным перпендикулярно оптической оси кристалла, в непрерывном режиме генерации

Пропускание выходного зеркала, %	Длина волны генерации, нм / состояние поляризации	Дифференциальная эффективность, %	Выходная мощность, мВт / длина волны генерации, нм
1	1602 / $\pi$ - → 1555 / $\sigma$ -	15→18	440 / 1602 515 / 1555
2	1602 / $\pi$ - → 1555 / $\sigma$ -	19→35	445 / 1602 750 / 1555
5.5	1531 / $\sigma$ -	26	660 / 1531
8	1531 / $\sigma$ -	23	780 / 1531

Максимальная выходная мощность лазерного излучения составила 780 мВт на длине волны 1531 нм, максимальная дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки - 35%. Установлено, что изменение длины волны (с 1602 нм на 1555 нм) и состояния поляризации лазерного излучения при увеличении мощности накачки для выходных зеркал с пропусканием 1% и 2% связано с влиянием наведенной термической линзы в активном лазерном элементе, что подтверждается экспериментальными измерениями зависимости оптической силы термической линзы от поглощенной мощности накачки и расчетами устойчивости резонатора лазера в зависимости от оптической силы термической линзы.

Для определения генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:GdAB, вырезанных вдоль оптической оси кристалла, использовались активные элементы толщиной 1.5 мм с различным содержанием ионов эрбия и иттербия. В качестве источника накачки использовался лазерный диод с высокой выходной мощностью до 15 Вт на длине волны 976 нм с волоконным выводом излучения. Схема резонатора и система фокусировки в лабораторной установке оставались неизменными. Генерационные характеристики кристаллов Er,Yb:GdAB, вырезанных вдоль оптической оси кристалла, представлены в таблице 2. Максимальные выходные характеристики лазера были получены при использовании кристалла Er,Yb:GdAB с содержанием ионов эрбия и иттербия 1.8 ат.% и 15 ат.%, соответственно. Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме работы достигала 1.75 Вт на длине волны 1550 нм, дифференциальная эффективность по поглощенной мощности составила 30%.

Таблица 2. – Результаты лазерных экспериментов с кристаллами Er,Yb:GdAB, вырезанными вдоль оптической оси кристалла, с различным содержанием ионов-активаторов

Содержание ионов Er <sup>3+</sup> , ат.%	Содержание ионов Yb <sup>3+</sup> , ат.%	Дифференциальная эффективность, %	Выходная мощность, Вт	Длина волны генерации, нм
1	8	25	1.44	1522
1.8	15	30	1.75	1550
2.1	17	23	1.95*	

\* Пиковая мощность в квазинепрерывном режиме генерации.

В подразделе 3.4.2 представлены результаты исследований генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:GdAB в режиме пассивной модуляции добротности. В качестве насыщающегося поглотителя использовался кристалл Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (Co:MALO) толщиной 0.75 мм с начальным пропусканием 98.2% на длине волны генерации 1522 нм. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром 120 мкм. При использовании кристалла Er(1 ат.%),Yb(8 ат.%):GdAB, вырезанного вдоль оптической оси кристалла, получены лазерные импульсы на длине волны 1522 нм с энергией 7 мкДж и длительностью 12 нс. Частота следования импульсов достигала 39 кГц при падающей мощности накачки 7.5 Вт. При использовании кристалла Er(1.8 ат.%),Yb(15 ат.%):GdAB, вырезанного вдоль оптической оси кристалла, и описанного выше насыщающегося поглотителя энергия лазерных импульсов на длине волны генерации 1550 нм достигала 18 мкДж при частоте следования 32 кГц и длительности импульсов 12 нс.

Установлено, что увеличение энергии импульсов лазера на кристалле Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> в режиме пассивной модуляции добротности с насыщающимся поглотителем Co:MALO при генерации на длине волны 1550 нм по сравнению с длиной волны 1522 нм обусловлено уменьшением поперечного сечения поглощения на длине волны генерации в активной среде.

Увеличение частоты следования импульсов более 32 кГц было ограничено повреждением диэлектрического покрытия. В целях предотвращения указанной проблемы использовалась импульсно-периодическая накачка со скважностью 2%. Максимальная средняя выходная мощность в режиме пассивной модуляции добротности 1.08 Вт, соответствующая энергии и частоте следования импульсов 18 мкДж и 60 кГц, соответственно, была получена при падающей пиковой мощности накачки около 11 Вт. Длительность лазерных импульсов не превышала 12 нс.

Для исследования возможности увеличения энергии лазерных импульсов проведены эксперименты при фокусировке излучения накачки в пятно большего диаметра – 200 мкм и 300 мкм. Значения длительности и частоты следования лазерных импульсов, полученные в данном случае, приведены в таблице 3. Как видно из таблицы, с увеличением диаметра пятна накачки с 120 мкм до 300 мкм и пиковой падающей мощности импульсно-периодической накачки с 11 Вт до 16.7 Вт энергия лазерных импульсов на длине волны 1550 нм увеличивается с 18 мкДж до 44 мкДж.

Таблица 3. - Выходные характеристики лазера на кристалле Er,Yb:GdAB, работающего в режиме пассивной модуляции добротности с импульсно-периодической накачкой

Диаметр пятна накачки, мкм	Пропускание выходного зеркала, %	Падающая мощность накачки, Вт	Энергия импульсов, мкДж	Длительность импульсов, нс	Частота следования импульсов, кГц
120	6	11	18	12	60
200		12.6	30	13	35
300		16.7	44	12	6.5

Для уменьшения длительности лазерных импульсов проведены эксперименты в «монолитной» конфигурации лазера. Для этих целей был изготовлен «чип», состоящий из насыщающегося поглотителя Co:MALO с начальным пропусканием 99.1% на длине волны 1550 нм и нанесенным на входную грань спектрорделительным покрытием и кристалла

Er(1.8 ат.%), Yb(15 ат.%) :GdAB с нанесенным на выходную грань покрытием выходного зеркала с пропусканием 6% на длине волны генерации 1550 нм, соединенным с насыщающимся поглотителем методом оптического контакта. Таким образом, геометрическая длина резонатора не превышала 2 мм, а лазер имел неразъемную конструкцию. Получена длительность лазерных импульсов 4 нс, энергия импульсов составляла 18 мкДж, максимальная частота следования импульсов не превышала 6 кГц при падающей мощности накачки 4 Вт и была ограничена нарушением оптического контакта между насыщающимся поглотителем и кристаллом при падающей мощности накачки более 4 Вт.

Показана возможность использования углеродных нанотрубок и графена в качестве насыщающих поглотителей лазера на кристалле Er,Yb:GdAB. Максимальная средняя выходная мощность в режиме пассивной модуляции добротности при использовании углеродных нанотрубок составила 400 мВт на длине волны 1550 нм. Частота следования и длительность импульсов составили 500 кГц и 120 нс, соответственно, величина энергии лазерных импульсов не превышала 0.8 мкДж. При использовании графена получены близкие выходные характеристики.

Раздел 4.1 главы 4 посвящен исследованию спектроскопических свойств кристаллов Er:YVO<sub>4</sub>, Er:LiLuF<sub>4</sub> (Er:LLF) и Er:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> (Er:KYW). Спектроскопические свойства кристаллов YVO<sub>4</sub>, LLF и KYW, активированных ионами Er<sup>3+</sup>, приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Спектроскопические свойства ионов Er<sup>3+</sup> в кристаллах YVO<sub>4</sub>, LLF и KYW

Параметр	Er:YVO <sub>4</sub>	Er:LLF	Er:KYW
Поперечное сечение поглощения на длине волны накачки 1531 нм, $\times 10^{-20}$ см <sup>2</sup> / состояние поляризации	2.0 / σ-	0.4 / α-	0.9 / E//N <sub>m</sub>
Длина волны генерации в спектральной области около 1.6 мкм, нм	1603	1609	1609
Поперечное сечение стимулированного испускания на длине волны генерации, $\times 10^{-20}$ см <sup>2</sup> / состояние поляризации	0.5 / π-	0.2 / α-	0.3 / E//N <sub>m</sub>
Поперечное сечение поглощения на длине волны генерации, $\times 10^{-20}$ см <sup>2</sup> / состояние поляризации	0.2 / π -	0.03 / α -	0.08 / E//N <sub>m</sub>
Радиационное время жизни уровня <sup>4</sup> I <sub>13/2</sub> ионов эрбия, мс	2.3	10.5	3.1

В разделе 4.2 приведено описание экспериментов по исследованию генерационных характеристик кристаллов YVO<sub>4</sub>, LLF и KYW, активированных ионами Er<sup>3+</sup>, при резонансной накачке в спектральной области около 1.5 мкм. Исследование проводилось в трёхзеркальном резонаторе, в качестве источника накачки использовался экспериментальный образец диоднонакачиваемого лазера на кристалле Er,Yb:GdAB, излучающий на длине волны 1531 нм с дифракционно-ограниченной расходимостью пучка (параметр распространения лазерного пучка  $M^2 < 1.5$ ), линейной поляризацией излучения (>1000:1) и максимальной выходной мощностью ~ 500 мВт.

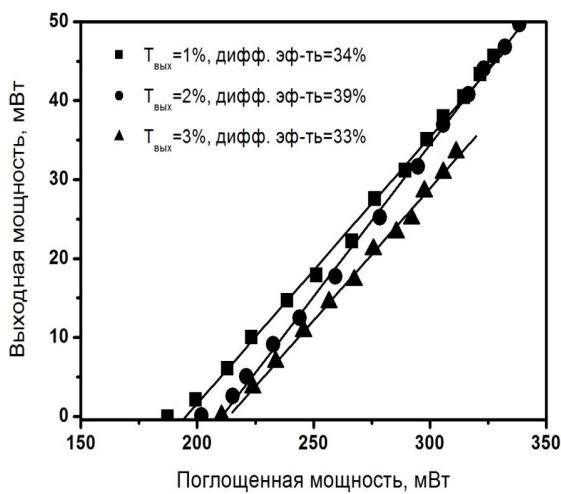
В подразделе 4.2.1 приведены генерационные характеристики кристалла Er(1 ат.-%):YVO<sub>4</sub> при резонансной накачке в спектральной области около 1.5 мкм. Максимальная выходная мощность лазера составила 55 мВт при поглощенной мощности накачки 120 мВт и дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки 56%. В рамках системы балансных уравнений без учета влияния ап-конверсионных процессов с уровня  ${}^4I_{13/2}$  на выходные характеристики лазера проведено моделирование работы лазера на кристалле Er:YVO<sub>4</sub> с продольной резонансной накачкой. Определено, что теоретическая и экспериментальная зависимости выходной мощности лазера от поглощенной мощности накачки находятся в хорошем соответствии. С использованием разработанной модели показана возможность двукратного увеличения выходной мощности до 115 мВт при падающей мощности накачки ~ 500 мВт. Дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки в данном случае будет достигать 71%.

В подразделе 4.2.2 представлены выходные характеристики лазера на кристалле Er(1 ат.-%):LLF с резонансной накачкой. Максимальная выходная мощность лазера 48 мВт на длине волны 1609 нм была получена при поглощенной мощности накачки равной 140 мВт. Дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки достигала 46%.

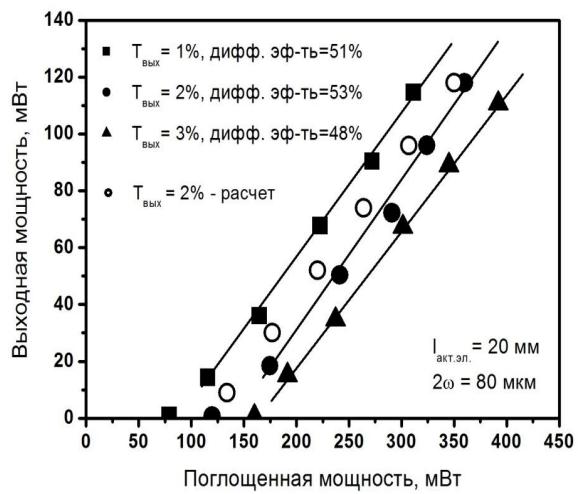
Подраздел 4.2.3 посвящен исследованию генерационных характеристик кристаллов Er:KYW с концентрацией ионов Er<sup>3+</sup> 2 ат.% и 1 ат.%. При использовании кристалла Er(2 ат.-%):KYW впервые реализована лазерная генерация в условиях резонансной накачки в области 1.5 мкм. Достигнуты максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность по поглощенной мощности накачки 50 мВт и 39% на длине волны генерации 1609 нм. Экспериментальная зависимость выходной мощности лазера на кристалле Er(2 ат.-%):KYW от поглощенной мощности накачки приведена на рисунке 4.

Обнаружено расхождение экспериментальных данных с результатами моделирования, что может быть связано с необходимостью учета для кристалла Er:KYW влияния ап-конверсионного перехода ( ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ) + ( ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ) с

последующим испусканием фотона с уровня  $^4I_{11/2}$  на длине волны 980 нм, как характеризующегося наибольшим влиянием на генерацию в спектральной области 1.5-1.6 мкм. По результатам моделирования определено, что для коэффициента ап-конверсии  $C_{up}=1.0\times10^{-17} \text{ см}^{-3}/\text{с}$  наблюдается хорошее соответствие экспериментальных данных и результатов моделирования для всех выходных зеркал как по порогам генерации, так и по значениям дифференциальной эффективности по поглощенной мощности накачки. С целью определения условий для повышения выходной мощности Er:KYW лазера проведены эксперименты с кристаллом Er:KYW с вдвое уменьшенной концентрацией ионов эрбия 1 ат.%. На рисунке 5 приведена зависимость выходной мощности Er(1 ат.%):KYW лазера от поглощенной мощности накачки для выходных зеркал с пропусканием 1%, 2% и 3%. В результате уменьшения содержания ионов-активаторов  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле Er:KYW удалось увеличить максимальную выходную мощность и дифференциальную эффективность по поглощенной мощности накачки до 118 мВт и 53%, соответственно. При этом порог генерации для зеркал с пропусканием 1% и 2% понизился до уровня 75 мВт и 120 мВт, соответственно. Длина волны генерации и поляризация излучения соответствовали случаю использования кристалла с содержанием ионов эрбия 2 ат.%. По результатам моделирования для кристалла Er(1 ат.%):KYW с учетом определенного ранее коэффициента ап-конверсии  $C_{up}$  наблюдается достаточно хорошее соответствие экспериментальных и теоретических данных.



**Рисунок 4.** – Зависимость выходной мощности лазера на кристалле Er(2 ат.%) : KYW от поглощенной мощности накачки



**Рисунок 5.** – Зависимость выходной мощности лазера на кристалле Er(1 ат.%) : KYW от поглощенной мощности накачки

## 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  в качестве активной среды впервые получена лазерная генерация в непрерывном режиме. Исследованы генерационные характеристики кристаллов  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , 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  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  впервые получен режим пассивной модуляции добротности. С насыщающимся поглотителем  $\text{Co}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$  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  $\text{Er}^{3+}$ . 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  $\text{Er}^{3+}$ , 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 апконверсионных переходов с верхнего лазерного уровня на эффективность и порог генерации лазера при повышении концентрации ионов эрбия. При использовании кристаллов  $\text{Er:LiLuF}_4$  и  $\text{Er:YVO}_4$  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  $\text{Er,Yb:GdAB}$  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:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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 Er<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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 (Er<sup>3+</sup>,Yb<sup>3+</sup>):GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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 YVO<sub>4</sub>: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:LiYF<sub>4</sub> и Er:LiLuF<sub>4</sub> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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<sub>4</sub> 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 Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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<sub>4</sub> 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 // 5<sup>th</sup> 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 Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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 Er:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 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  $\text{Er}^{3+}:\text{KY(WO}_4)_2$  crystals / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, N.V. Kuleshov, A.A. Pavlyuk, V.N. Matrosov // 16<sup>th</sup> 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 Er,Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, A.A. Pavlyuk, N.V. Kuleshov // The 4<sup>th</sup> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> and Er:LiYF<sub>4</sub> crystals for eye-safe in-band pumped lasers / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, S.L. Koraleva, 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser / K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, S.V. Kurilchik, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov // 17<sup>th</sup> 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. Koraleva, V.V. Semashko // 17<sup>th</sup> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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 // 7<sup>th</sup> 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:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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

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

**Ключавыя слова:** эрбій, ітэрбій, спектральна-люмінесценцэнтныя 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 выпраменяваюць у спектральний вобласці 1.5-1.6 мкм, з напампоўкай у вобласці 1 мкм і 1.5 мкм.

**Метады даследавання:** эксперыментальная метады даследавання спектраскалічных ўласцівасцяў і генерацыйных характеристык новых лазерных асяроддзяў.

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

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** вызначаны спектральна-люмінесценцэнтныя ўласцівасці даследаваных матэрыялаў: вызначаны спектры папярочныя сячэнняў паглынання, стымуляванага выпраменявання і ўзмацнення, даследаваны кінетыкі люмінесценцыі ўзбуджаных станаў актыўных іёнаў, эфектыўнасці пераносу энергіі ад іёнаў ітэрбія да іёнаў эрбія. Пры выкарыстанні крышталя  $\text{Er},\text{Yb}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  ва ўмовах дыёдной напампоўкі ў вобласці 1 мкм упершыню рэалізавана лазерная генерацыя і знайдзены генерацыйныя характеристыкі ў бесперапынным рэжыме генерацыі і рэжыме пасіўнай мадуляцыі дабротнасці. Даследаваны генерацыйныя характеристыкі крышталя  $\text{Er}: \text{YVO}_4$  і  $\text{Er}:\text{LiLuF}_4$  у вобласці 1.6 мкм пры рэзананснай напампоўцы ў вобласці 1.5 мкм. Пры выкарыстанні крышталя  $\text{Er}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$  ва ўмовах рэзананснай напампоўкі ўпершыню рэалізаваны бесперапынны рэжым генерацыі з высокай эфектыўнасцю генерацыі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянењия.** Даследаваныя ў рабоце матэрыялы рэкамендуюцца для выкарыстання ў лазерным прыборабудаванні дзеля стварэння на іх аснове кампактных і эфектыўных крыніц выпраменявання 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 Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> 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<sub>4</sub> и Er:LiLuF<sub>4</sub> в области 1.6 мкм при резонансной накачке в области 1.5 мкм. При использовании кристалла Er:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 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 $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$  under pumping at near 1  $\mu\text{m}$  and 1.5  $\mu\text{m}$ .

**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 Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal was demonstrated under diode-pumping at near 1  $\mu\text{m}$  for the first time to our knowledge, laser characteristics of Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal were investigated. The in-band pumped laser operation of Er:YVO<sub>4</sub> and Er: LiLuF<sub>4</sub> crystals at near 1.6  $\mu\text{m}$  was studied. The high efficient in-band pumped continuous-wave Er:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 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  $\mu\text{m}$  laser sources.