

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ИМЕНИ Б.И. СТЕПАНОВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 621.373.826.03; 535.37; 535.8

ГРИГОРЬЕВ Александр Викторович

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ
СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1,5 – 1,6 мкм
С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Минск, 2017

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси».

Научный руководитель: **Рябцев Андрей Геннадьевич,**
кандидат физико-математических наук,
доцент, ведущий научный сотрудник
Института физики НАН Беларуси

Официальные оппоненты: **Гапоненко Сергей Васильевич,**
доктор физико-математических наук,
академик НАН Беларуси, заведующий
лабораторией нанооптики
Института физики НАН Беларуси

Ануфрик Славомир Степанович,
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой лазерной
физики и спектроскопии Гродненского
государственного университета имени
Янки Купалы.

Оппонирующая организация: **Белорусский государственный
университет**

Защита состоится 3 октября 2017 г. в 14³⁰ на заседании совета по защите диссертации Д 01.05.01 при Институте физики НАН Беларуси по адресу: 220072, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости 68, к. 218.
e-mail: ponyavina@ifanbel.bas-net.by, телефон учёного секретаря: 284–04–50.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики НАН Беларуси.

Автореферат разослан “21” августа 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертации
доктор физико-математических наук

А.Н. Понявина

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные лазеры с диодной накачкой (ТЛДН), генерирующие в диапазоне длин волн $\lambda \sim 1,5 - 1,6$ мкм, являются перспективными источниками излучения для приборов дальнометрии, целеуказания, медицины и спектроскопии.

Среди компактных источников спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм наибольшее распространение получили твердотельные лазеры с активным элементом (АЭ) на основе иттербий–эрбиевого стекла, лазеры, работающие в режиме вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР), а также параметрические генераторы света, задающие лазеры которых создаются на основе активных кристаллов Nd:YAG, накачиваемых мощными линейками или матрицами лазерных диодов.

Применение диодной накачки для возбуждения активных сред позволяет более чем на порядок уменьшить уровень энергопотребления, по сравнению с уровнями, характерными для условий ламповой накачки. Наиболее высоким уровнем компактности и качеством выходного излучения характеризуются лазерные излучатели на иттербий–эрбиевом стекле, генерирующие в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм и позволяющие обеспечить надежную работу в широком интервале температур окружающей среды. Однако в ряде современных оптоэлектронных систем требуются компактные и эффективные лазерные источники излучения с энергией генерируемых импульсов не менее десяти миллиджоулей при частотах повторения 10 и более герц. Поэтому, наряду с исследованием предельных характеристик иттербий–эрбиевых лазеров, большое внимание уделяется изучению свойств параметрических генераторов света и ВКР-лазеров с задающими лазерами на основе кристаллических АЭ, позволяющими существенно продвинуться в область больших энергий и частот повторения импульсов излучения.

Настоящая работа посвящена изучению энергетических и временных характеристик твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой, излучающих в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм. Основное внимание уделено определению степени влияния паразитных типов излучения на пороговые и мощностные свойства ТЛДН на основе эрбий– и неодим–содержащих активных сред. Экспериментально и теоретически на основе компьютерных моделей изучены оптические процессы в активных средах твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой и определены параметры оптических резонаторов и режимов работы, обеспечивающих наиболее эффективное преобразование энергии накачки в энергию

выходного пучка. Отдельные ключевые позиции рекомендаций, направленных на улучшение эксплуатационных параметров компактных твердотельных лазеров, защищены патентами Республики Беларусь.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Все основные разделы диссертации связаны с заданиями, входящими в состав следующих программ и контрактов:

“Исследовать параметры ФПУ, излучателя и их макетов” (задание 6.2.2 ГНТП “ОПТОТЕХ”, подпрограмма “Оптотех–2”, № ГР 20066789, 2006–2007 гг.), “Разработка и исследование ультрафиолетовых фотодетекторов, мощных полупроводниковых лазеров и светодиодов для промышленных, медицинских и научных применений” (задание ГПНИ Электроника и Фотоника 1.2.06, № ГР 20140831, 2014 – 2015 гг.), НТП СГ “Перспективные полупроводниковые гетероструктуры и приборы на их основе” (шифр “Прамень”, мероприятие 5, № ГР 20120525, 2011 – 2014 гг.; мероприятие 7, № ГР 20120526, 2011 – 2014 гг.; мероприятие 8, № ГР 20120529, 2011 – 2015 гг.), НТП СГ «Разработка критических стандартных технологий проектирования и изготовления изделий наноструктурной микро- и оптоэлектроники, приборов и систем на их основе и оборудования для их производства и испытаний» (шифр «Луч», мероприятие 3.2, № ГР 20163441, 2016 – 2020 гг.), а также Международных контрактов 177 (“Совместная разработка лазера с диодной накачкой, излучающего в условно безопасной для глаз спектральной области, с большой энергией выходного излучения”, с компанией Lastec, г. Дели, Индия, № ГР 20093303, 2008–2011 гг.) и 178 (“Совместные экспериментальные исследования лазерных диодных линеек с целью увеличения выходной мощности излучателей”, с компанией SSPL, г. Дели, Индия, № ГР 20093304, 2008–2011 гг.), контрактов № 768 “Частотный эрбиевый лазер с диодной накачкой” (ООО “Квантово-оптические системы”, г. Москва, РФ), № 25–60 ИОР–Acuity “Разработка импульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой и ПГС, излучающего на длине волны 1,571 мкм” (компания Acuity Technologies Inc., г. Менло Парк, США), № 248 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера ИФЛ–Э81-П” (ЗАО “ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ), № 14/006–305 “Разработка, изготовление и поставка квантрона – Nd:YAG, 5x100 мм, 300 мДж, 20 Гц, 1 шт.” (ЗАО “Солар ЛС”, г. Минск), № 2201/2015/303 “Разработка, изготовление и поставка импульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой и ПГС, излучающий на длине волны 1517 нм, IFL–N1530-

ОРО” (“UniNanoTech Co., Ltd.”, Yongin–Si, Корея), № 286 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера (оптическая система) ИФЛ–Э81–П” (ЗАО “ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ), № 331 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера (оптическая система) ИФЛ–Э81–П” (ЗАО “ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ), № 1006/2015/395 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера (оптическая система) с диодной накачкой и активной модуляцией добротности, IFL–E105–EO” (Vigitek, Inc., Darien, США), № 405 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера (оптическая система) ИФЛ–Э81–П” (ЗАО “ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ), № 323 “Разработка, изготовление и поставка импульсного Nd:YAG лазера с диодной накачкой и ПГС, излучающего на длине волны 1571 нм IFL–N1530–ОРО” (AMS Technologies AG, Martinsried, Германия), № 453 “Разработка, изготовление и поставка компактного эрбиевого лазера с диодной накачкой IFL–E85–P1535” (Oxford Instruments Analytical Oy, Espoo, Финляндия), № 454 “Разработка, изготовление и поставка оптической системы IFL–N1530–ОРО–EF” (AMS Technologies AG, Martinsried, Германия), № 458 “Разработка, изготовление и поставка эрбиевого лазера (оптическая система) ИФЛ–Э81–П” (ЗАО “ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ), № 464 “Разработка, изготовление и поставка компактного эрбиевого лазера с диодной накачкой IFL–E85–P1535” (UAB Optogama, Вильнюс, Литва).

Цель и задачи исследования

Основной целью диссертационной работы является установление доминирующих механизмов потерь энергии и разработка методов их минимизации и оптимизации условий возбуждения в твердотельных лазерах спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм с поперечной диодной накачкой на основе моделирования энергетических и временных характеристик и использования оригинальных схем активного элемента и резонатора.

В процессе достижения цели научных исследований решались следующие задачи:

1. На основе системы скоростных уравнений изучить влияние усиленной люминесценции на временные характеристики иттербий–эрбиевого лазера с поперечной диодной накачкой и пассивной модуляцией добротности.

2. Разработать способ управления иттербий–эрбиевым лазером с пассивной модуляцией добротности, позволяющий автоматически поддерживать заданный режим работы лазера при изменении условий генерации.

3. Разработать теоретическую модель, описывающую динамику излучения квантрона задающего лазера на основе кристалла Nd:YAG с учетом процессов усиления люминесценции и развития паразитных мод генерации. На основании сопоставления теоретических и экспериментальных данных определить роли усиленной люминесценции и паразитных мод генерации в динамике излучения квантрона при различных уровнях накачки.

4. Разработать оптическую схему квантрона импульсного задающего лазера на основе кристалла Nd:YAG с поперечной диодной накачкой, позволяющую уменьшить степень влияния усиленной люминесценции и паразитных кольцевых мод генерации на выходные характеристики излучения, экспериментально оценить эффективность ее применения.

5. Разработать метод наиболее эффективного согласования характеристик диодных линеек, активного элемента, и оптического резонатора эрбиевого лазера с поперечной накачкой.

6. Исследовать возможность повышения энергии излучения в спектральном диапазоне от 1,5 до 1,6 мкм путем применения слэб-конфигурации активного элемента в лазере на эрбиевом стекле и твердотельном ВКР-лазере.

Объектом исследования являются твердотельные лазеры с поперечной диодной накачкой на основе эрбиевых и неодимовых активных элементов, применяемые в дальнометрии, спектроскопии и оптических устройствах специального назначения. Предмет исследования – временные и энергетические характеристики полностью твердотельных лазерных излучателей, генерирующих в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм.

Научная новизна

В диссертационной работе теоретически и экспериментально изучено влияние таких оптических процессов, как усиление люминесценции и формирование паразитных кольцевых мод генерации, на выходные характеристики излучения твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой, работающих в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм, предложены подходы к оптимизации и управлению параметрами излучения исследуемых лазеров. Наиболее существенные и новые результаты можно охарактеризовать следующим образом:

- Установлена степень влияния процесса усиления люминесценции на временные и энергетические характеристики иттербий-эрбиевого лазера с пассивной модуляцией добротности.

- Предложен оригинальный способ управления лазером с пассивной

модуляцией добротности для его автоматической работы при изменении пороговых условий генерации.

- Проведен анализ степени влияния усиленной люминесценции и паразитных мод генерации на интенсивность выходного излучения квантрона задающего Nd:YAG лазера с поперечной диодной накачкой при различных уровнях мощности накачки.

- Предложена новая конструкция квантрона задающего Nd:YAG лазера с распределением элементов накачки вдоль активного элемента, вклеенного в теплоотвод при помощи оригинального рассеивающего клеящего состава.

- Предложен оригинальный метод нахождения оптимального взаимного расположения диодных линеек и активного элемента в заданном оптическом резонаторе для лазеров на иттербий эрбиевом стекле с поперечной диодной накачкой.

- Установлено, что использование активных элементов в слэб-конфигурации позволяет повысить выходную энергию лазера на иттербий-эрбиевом стекле с поперечной диодной накачкой и обеспечить эффективное ВКР-самопреобразование в твердотельном Nd:KGW лазере.

Положения, выносимые на защиту

1. Процесс усиления люминесценции в лазере с активным элементом на основе боросиликофосфатного стекла, легированного ионами иттербия и эрбия, с пассивной модуляцией добротности и диодной накачкой не оказывает существенного влияния на энергию и длительность импульсов излучения, но приводит к изменениям времени задержки генерации и частоты следования импульсов, не превышающим 5 % и 11 %, соответственно.
2. Насыщение интенсивности излучения квантрона задающего неодимового лазера при высоких уровнях накачки определяется развитием в активном элементе замкнутых кольцевых мод генерации.
3. Метод согласования оптических и геометрических характеристик диодных линеек, активного элемента и резонатора, основанный на достижении максимального значения инверсной населенности, усредненной по объёму лазерной моды в активной среде, позволяющий определить оптимальное расположение линеек относительно возбуждаемого элемента.
4. Применение активного элемента со слэб-конфигурацией приводит к росту энергии выходного излучения на 35 % и уменьшению длительности импульса излучения эрбиевого лазера с поперечной диодной накачкой до 10 нс за счёт увеличения усиления за проход при зигзагообразном ходе

лучей, по сравнению с использованием цилиндрического активного элемента при прочих равных условиях.

Личный вклад соискателя

Диссертация отражает личный вклад автора в исследования, проведенные в Институте физики НАН Беларуси. Он заключается в выполнении основной части теоретических и экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов. Научный руководитель А.Г. Рябцев сформулировал общее направление научного исследования и возможные пути реализации поставленных задач, оказывал методическую помощь при их выполнении, участвовал в обсуждении, анализе и интерпретации результатов. Вклад соавторов заключался в помощи при подготовке и проведении отдельных экспериментальных исследований (М.В. Богданович, А.И. Енжиевский, М.А. Щемелев, П.В. Шпак, О.Е. Костик, Л.Л. Тепляшин), содействии в разработке численных моделей и проведении части расчетов (А.С. Дементьев, М.В. Богданович, А.И. Енжиевский, Е.В. Лебедев, Г.И. Рябцев), обсуждении и интерпретации полученных результатов (Г.И. Рябцев, А.С. Дементьев, М.В. Богданович).

Апробация результатов диссертации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 6-ой Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” (Минск, 2007); Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, лазерам, их приложениям и технологиям ICONO/LAT-2007 (Минск, 2007); VII Международная конференция “Лазерная физика и оптические технологии” (Минск, 2008); Симпозиум “Полупроводниковые лазеры: физика и технология” (С.-Петербург, 2008); 7-ой Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” (Минск, 2009); 18-ый Белорусско-Литовский семинар “Лазеры и оптическая нелинейность” (Вильнюс, 2009); International Conference “Northern Optics 2009”, (Вильнюс, 2009), VIII Международная конференция “Лазерная физика и оптические технологии” (Минск, 2010); Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, лазерам, их приложениям и технологиям ICONO/LAT 2010 (Казань, 2010), 19-ый Белорусско-Литовский семинар “Лазеры и оптическая нелинейность” (Минск, 2011); 8-ой Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” (Минск, 2011); IX Международная конференция “Лазерная физика и

оптические технологии” (Гродно, 2012); XIX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications (Стамбул, 2012); 3–ий Симпозиум “Полупроводниковые лазеры: физика и технология” (С.–Петербург, 2012); SPIE European Conference on Optics and Optoelectronics (SPIE EOO 2013) (Прага, 2013); 9–ый Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” (Минск, 2013); 16th International Conference Laser Optics 2014 (С.–Петербург, 2014); 10–ый Белорусско-Российский семинар “Полупроводниковые лазеры и системы на их основе” (Минск, 2015), 17–ая Международная конференция “Laser Optics 2016” (С.–Петербург, 2016); Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике, лазерам, их приложениям и технологиям ICONO/LAT-2016 (Минск, 2016), 5–ый Симпозиум “Полупроводниковые лазеры: физика и технология” (С.–Петербург, 2016).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 работах: в 6 статьях в научных изданиях, соответствующих п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 1 статье в Сборнике статей международного научного семинара и четырех патентах Республики Беларусь.

Общий объем публикаций по теме диссертации, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, составляет 3,5 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложения.

Объем диссертации – 111 страниц, включая 95 страниц основного текста, перечень условных обозначений на 4 страницах, 46 рисунков и 5 таблиц на 46 страницах, список используемых источников из 157 наименований, а также список публикаций соискателя из 11 наименований. Приложения включают 2 акта использования результатов диссертации.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В первой главе “Энергетические и временные характеристики твердотельных лазеров с диодной накачкой” представлен обзор литературы, посвящённой методам изучения паразитных типов излучения в активных средах твердотельных лазеров и их влиянию на выходные характеристики излучателей, методам эффективного согласования параметров лазерного резонатора твердотельных лазеров с излучением накачки, а также анализу особенностей существующих решений для создания высокоэффективных компактных источников излучения для спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм.

Глава 2 “Усиленная люминесценция и характеристики выходного излучения твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой” посвящена изучению влияния усиленной люминесценции (УЛ) и паразитных мод генерации (ПМГ) на выходные характеристики лазера на иттербий-эрбиевом стекле и задающего лазера на основе Nd:YAG.

Раздел 2.1 посвящён теоретическому анализу влияния усиленной люминесценции на временные и энергетические характеристики иттербий-эрбиевого лазера с пассивной модуляцией добротности. Моделирование динамики формирования излучения лазера на основе боро-силико-фосфатного стекла, активированного ионами иттербия и эрбия, с пассивным затвором, изготовленным из кристалла шпинели, легированного ионами кобальта (Co^{2+} : MgAl_2O_4) выполнялось на основе системы скоростных уравнений для населенностей энергетических уровней ионов, а также для числа фотонов генерации и усиленной люминесценции.

Численное решение системы уравнений показало, что усиленная люминесценция в общем случае приводит к изменению временного интервала, необходимого для реализации пороговых условий генерации лазера (рисунок 1). Величина изменения данного интервала зависит от параметров резонатора, активного элемента и пассивного затвора. При этом практически не заметно влияние усиленной люминесценции на длительность импульса генерации, а также энергию выходного импульса.

В разделе 2.2 данной главы описан оригинальный способ управления эрбиевым лазером с пассивной модуляцией добротности, позволяющий автоматически поддерживать требуемый режим работы излучателя, за счёт компенсации изменения пороговых условий для лазерной генерации регулировкой амплитуды и длительности импульса тока накачки. Контроль возникновения выходного лазерного импульса при этом осуществляется фотоприёмным устройством.

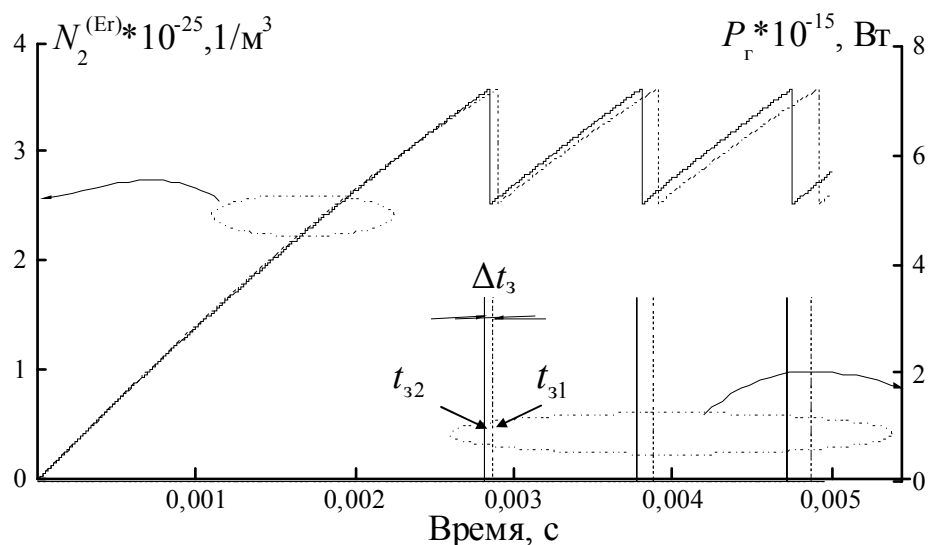


Рисунок 1. – Временные зависимости населенности энергетического уровня эрбия ${}^4I_{13/2}$ и мощности выходного излучения с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) влияния усиленной люминесценции

В разделе 2.3 приведены результаты теоретического анализа временных зависимостей интенсивности излучения квантрона задающего Nd:YAG лазера, на основе цилиндрического активного элемента длиной 50 мм, диаметром 5 мм, при различных уровнях накачки тремя матрицами лазерных диодов. Анализ проводился на основе системы уравнений, описывающей четырёхуровневую модель работы лазера, включающую процессы усиления люминесценции и генерации замкнутых паразитных мод. Предложенная модель показала хорошее согласование экспериментальных и теоретических данных (рисунки 2, 3).

Установлено, что при низких уровнях накачки ($\leq 2500 - 2600$ Вт) характер временной зависимости интенсивности полностью определяется спонтанными переходами, а роль усиленной люминесценции и паразитных мод генерации пренебрежимо мала. При уровнях мощности накачки 4000-6000 Вт доминирующим оптическим процессом в активном элементе квантрона является развитие мощного потока усиленной люминесценции, что проявляется в регистрируемом быстром нелинейном росте интенсивности выходного излучения. Также обнаружено, что превышение пороговых условий и начало генерации паразитных замкнутых мод в исследуемом квантроне происходит при высоких уровнях накачки свыше 6400 Вт, что приводит к насыщению временной зависимости интенсивности выходного излучения.

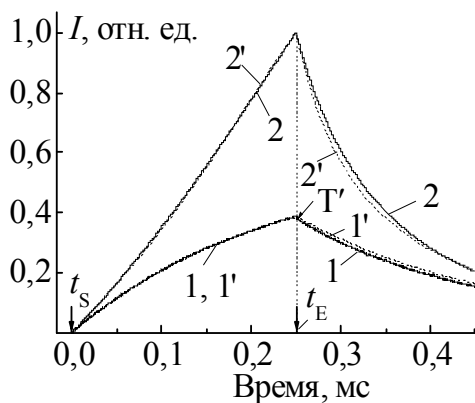


Рисунок 2. – Экспериментальные (1, 2) и расчетные (1', 2') зависимости интенсивности излучения I , выходящего из торца активного элемента, от времени t при уровнях суммарной импульсной накачки, Вт: 2600 (1, 1'), 6000 (2, 2')

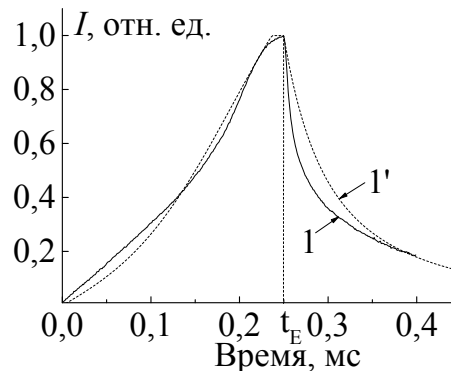
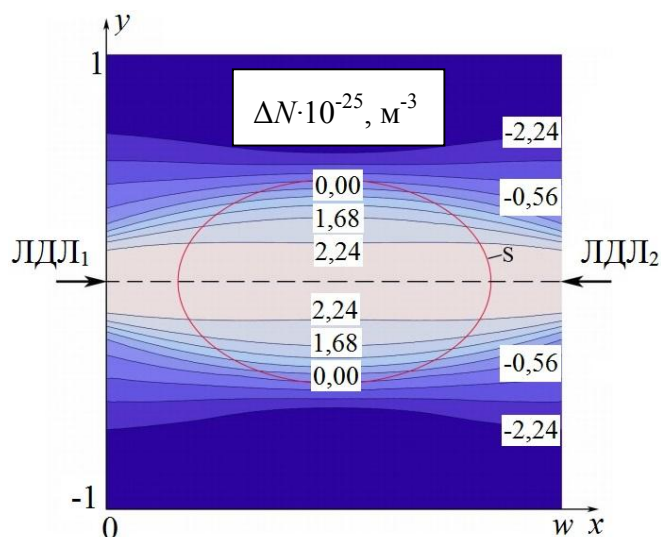


Рисунок 3. – Экспериментальные (1) и расчетные (1') зависимости интенсивности излучения I , выходящего из торца активного элемента, от времени t при суммарной импульсной мощности накачки 6400 Вт

Предложена оптическая схема квантрона для задающего лазера на основе кристалла Nd:YAG, в которой использован кристалл длиной 90 мм, а излучение накачки матриц лазерных диодов распределено по длине активной среды. Для фиксации активного элемента в держателе квантрона использован оригинальный оптический клеящий состав, формирующий рассеивающий слой на боковой поверхности АЭ. Показано, что использование данного квантрона в лазере с электрооптической модуляцией добротности позволило повысить энергию на 43 % по сравнению со случаем использования квантрона без распределения излучения накачки вдоль АЭ и рассеивающего слоя.

В главе 3 “Оптимизация условий возбуждения иттербий–эрбиевого активного элемента лазерными диодными линейками” описывается метод определения оптимального взаимного расположения диодных линеек и активного элемента в заданном оптическом резонаторе. Представленный метод подходит для активных элементов прямоугольной и круглой формы, а также для случая p - и s -поляризации излучения линеек лазерных диодов.

На основании расчёта распределения интенсивности накачки по сечению активного элемента, а также разработанной модели иттербий–эрбиевого лазера, производится расчёт распределения инверсной населенности по сечению активной среды. Пример распределения инверсной населенности для случая прямоугольного активного элемента и симметричной накачки линейками лазерных диодов симметрично с двух сторон представлен на рисунке 4.

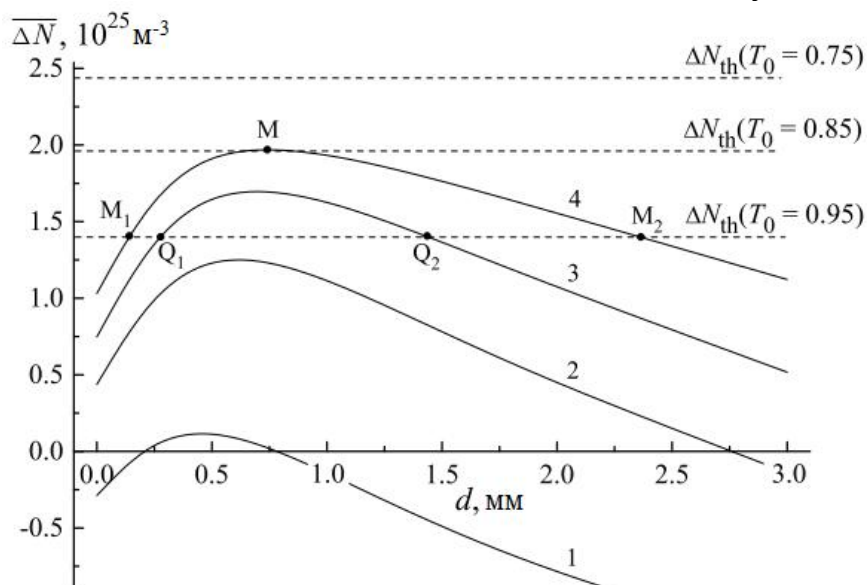


w – толщина активного элемента, S – контур моды генерации

Рисунок 4. – Пространственное распределение инверсной населенности по сечению прямоугольного активного элемента при накачке двумя симметрично расположенными лазерными диодными линейками (ЛДЛ)

Для согласования взаимного расположения элементов накачки и активного элемента вводится величина $\overline{\Delta N}$ – инверсная населенность, усреднённая по площади поперечного сечения лазерной моды, рассчитанной для данного типа резонатора.

На рисунке 5 представлены зависимости $\overline{\Delta N}(d)$ (d – расстояние между лазерными диодными линейками (ЛДЛ) и АЭ), полученные при характерных для лазеров на Yb, Er-стекле значениях длительности импульса накачки.



1 – длительность импульса 1 мс, 2 – 2 мс, 3 – 3 мс; 4 – 5 мс

Рисунок 5. – Зависимость значения усредненной по сечению моды инверсной населенности от расстояния между ЛДЛ и АЭ для различных значений длительности импульса излучения накачки

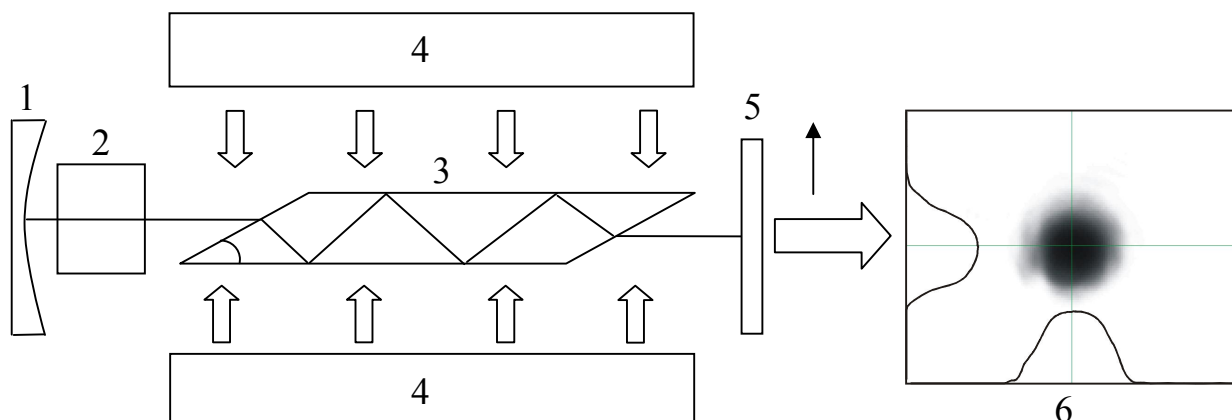
Показано, что величина $\overline{\Delta N}$ имеет выраженный максимум в зависимости от расстояния от лазерных диодных линеек до активного элемента лазера. Положение максимума при увеличении длительности импульса тока накачки смещается в сторону увеличения d . Данный максимум соответствует наиболее эффективному преобразованию энергии излучения накачки лазерных диодных линеек в формируемую моду генерации эрбиевого лазера. При практической реализации предлагаемого подхода определялась пороговая величина инверсной населенности разрабатываемого эрбиевого лазера ΔN_{th} , затем проводилось совместное рассмотрение полученных зависимостей $\overline{\Delta N}(d)$ для разных длительностей импульса и уровней пороговой населенности ΔN_{th} (рисунок 5). Это давало возможность практического подбора наиболее оптимальных параметров резонатора лазера, мощности накачки и расположения лазерных диодных линеек, а также геометрии активного элемента для обеспечения максимальной эффективности работы лазера.

Метод был применен для иттербий-эрбиевого лазера с длиной резонатора 66 мм, длиной активного элемента 32 мм, коэффициентом отражения выходного зеркала 70 %, величиной начального пропускания пассивного затвора 85 %. Оптимальное расчётное расстояния между ЛДЛ и поверхностью АЭ составило 0,72 мм, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением 0,7 мм.

Глава 4 “Компактные высокоэнергетические излучатели в спектральном диапазоне от 1,5 до 1,6 мкм” посвящена разработке, созданию и исследованию характеристик компактных твердотельных источников излучения спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм.

Раздел 4.1 посвящен расчёту геометрии активного элемента, а также изучению мощностных, временных и пространственных характеристик разработанного слэб-лазера (лазера с активным элементом в виде усеченного параллелепипеда) на иттербий-эрбиевом стекле, оптическая схема которого представлена на рисунке 6. Проведены измерения основных характеристик излучателя в режиме свободной генерации, пассивной и активной модуляции добротности. Проведен сравнительный анализ выходных характеристик исследуемого излучателя с параметрами лазера на основе цилиндрического активного элемента. Показано, что за счёт более эффективного использования энергии излучения накачки и увеличения усиления за проход при зигзагообразном ходе лучей энергия в импульсе выходного излучения слэб-лазера при пассивной модуляции достигает 1,3 мДж, с длительностью не более 19 нс, а при активной модуляции – 2,3 мДж, при длительности импульса 9 – 10 нс. Установлено, что использование активного элемента слэб-конфигурации позволяет увеличить выходную энергию на 30 – 35 % по

сравнению с цилиндрическим активным элементом при сравнимых условиях накачки.



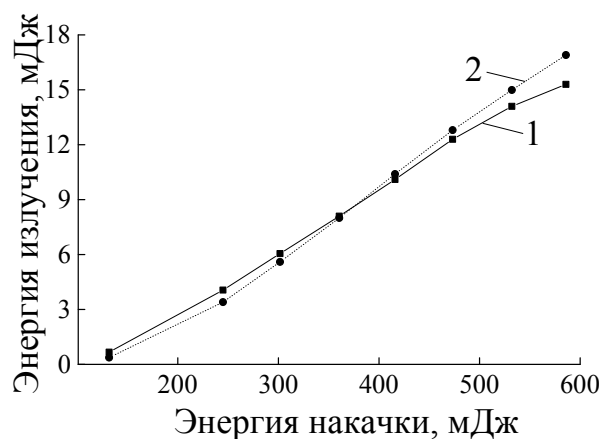
1 – «глухое» сферическое зеркало $r = 500$ мм; 2 – оптический затвор (активный или пассивный); 3 – активный элемент; 4 – лазерные диодные линейки; 5 – выходное плоское зеркало с $R = 88\%$; 6 – поперечный профиль распределения интенсивности выходного пучка

Рисунок 6. – Схема слэб-лазера с поперечной диодной накачкой

В разделе 4.2 исследуется полностью твердотельный лазер с ВКР-самопреобразованием, созданный на основе оригинальной оптической схемы с двумя последовательно расположенными активными элементами Nd:KGW, накачиваемыми с двух сторон матрицами лазерных диодов. На рисунке 7 представлены зависимости выходной энергии излучения первой стоксовой компоненты экспериментального образца лазера, генерирующего импульсы с частотой 1 Гц при различных уровнях накачки и коэффициентах отражения выходного зеркала. Установлено, что при частотах повторения импульсов излучения вплоть до 5 Гц без системы термостабилизации энергия импульсов и вид поперечного распределения не меняется от импульса к импульсу во всем диапазоне уровней накачки, при этом значение параметра M^2 для лазерной системы составляет 2,1, а расходимость не превышает 10 мрад.

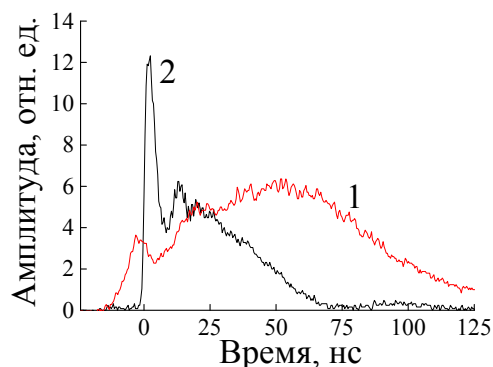
Рисунок 8 демонстрирует осциллограммы импульсов излучения с длиной волны 1351 нм и стоксова (1538 нм) излучения исследуемого лазера. На осциллограмме лазерного импульса с длиной волны 1538 нм отчетливо различим второй импульс, связанный, по-видимому, с тем, что для поперечной лазерной моды нулевого порядка меньше коэффициент потерь по сравнению с модами высшего порядка. Поэтому порог ВКР-

преобразования для нулевой поперечной моды достигается быстрее, что выражается в возникновении отчетливого пика во временной зависимости.



1, 2 – энергия выходного излучения на длине волны 1538 нм для выходных зеркал с R = 60 и 40 % соответственно

Рисунок 7. – Экспериментальные зависимости энергии выходного излучения на длине волны 1,538 от суммарной энергии импульса накачки



1 – излучение с длиной волны 1351 нм, 2 – первая стоксова компонента 1538 нм

Рисунок 8. – Осциллограмма импульсов выходного излучения ВКР-лазера

Таким образом, показано, что применение предложенной схемы лазера позволяет получать энергии до 17 мДж при частоте 1 – 5 Гц и до 7 мДж при частоте 10 Гц без принудительного охлаждения. В пределах одного заданного значения частоты повторения импульсов сохраняется высокая степень стабильности значения энергии выходного излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С целью изучения влияния процесса усиления люминесценции временные характеристики иттербий-эрбиевого лазера с пассивным модулятором добротности на основе $\text{Co:MgAl}_2\text{O}_4$ составлена система скоростных уравнений для населённостей уровней ионов эрбия, иттербия и кобальта и уравнений для числа фотонов генерации и усиленной люминесценции. Расчетом установлено, что усиленная люминесценция приводит к изменению времени задержки генерации в пределах 5 % и частоты следования импульсов генерации – 11 %. При этом изменение пиковой выходной мощности и длительности импульса излучения не превышает 1 % [2].

2. Предложен, испытан и запатентован способ управления лазером с пассивной модуляцией добротности на основе контроля появления выходного импульса лазерного излучения фотоприёмным устройством. Способ позволяет автоматически поддерживать заданный режим работы лазера, компенсируя изменение пороговых условий возникновения лазерного импульса регулировкой тока и длительности импульса накачки. Предложенный подход был применен при создании высокоэффективных лазерных источников в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм, работающих в широком интервале температур окружающей среды (от – 40° С до + 60° С) [1, 7, 9, 10].

3. Для анализа временных характеристик излучения квантрона задающего Nd:YAG лазера составлена система скоростных уравнений для населенности верхнего лазерного уровня и числа фотонов замкнутых паразитных мод генерации, учитывающая процесс усиления люминесценции в активной среде. В результате выполненных расчетов установлено, что при высоких уровнях накачки 6400 Вт насыщение временной зависимости интенсивности излучения квантрона определяется развитием в активном элементе кольцевых замкнутых мод. При меньших мощностях накачки 4000 – 6000 Вт суперлинейный рост интенсивности излучения квантрона определяется, главным образом, усиленной люминесценцией. При относительно низких уровнях накачки ($\leq 2500 - 2600$ Вт) влияние УЛ и ПМГ не обнаружено [5].

4. Экспериментально показано, что нанесение оригинального оптического рассеивающего клеящего состава на боковую поверхность активного элемента длиной 90 мм, возбуждаемого с трех сторон матрицами лазерных диодов, равномерно распределенными вдоль кристалла Nd:YAG, позволило увеличить выходную энергию в моноимпульсе на 43 %, энергия достигла значения 210 мДж [3, 11].

5. Для лазеров с поперечной диодной накачкой предложен метод определения оптимального взаимного расположения диодных линеек и активного элемента в заданном оптическом резонаторе. Метод базируется на расчёте усреднённой по лазерной моде инверсной населенности активной среды и определении расположения лазерных диодных линеек, соответствующего её максимальному значению. Метод был применен для иттербий-эрбиевого лазера с длиной резонатора 66 мм, длиной активного элемента 32 мм, коэффициентом отражения выходного зеркала 70 %, и начальным пропусканием пассивного затвора 85 %. Оптимальное расчётное расстояния между ЛДЛ и поверхностью АЭ составило 0,72 мм, что хорошо согласуется с экспериментально полученным значением 0,7 мм [6].

6. Установлено, что более эффективное использование накачиваемого объема активной среды при зигзагообразном ходе лучей в активном

элементе слэб-конфигурации по сравнению с цилиндрическим АЭ повышает энергию лазерного излучения на 35 %, и уменьшает длительность импульса на 20 % в режиме активной модуляции добротности [1, 8].

7. Использование оптической схемы с двумя последовательно расположенными активными элементами в лазере с ВКР-самопреобразованием привело к уменьшению влияния тепловых эффектов в кристаллах и позволило получить импульсы излучения с энергией до 17 мДж и частотой следования до 5 Гц с высокой пространственной и энергетической стабильностью без принудительного охлаждения [4].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Результаты исследования временных характеристик излучения, а также методика оптимизации условий возбуждения и генерации твердотельных иттербий–эрбиевых лазеров с поперечной диодной накачкой (в том числе и с активными элементами со слэб–конфигурацией) были использованы при разработке и создании новых типов излучателей, предназначенных для работы в спектральном интервале 1,5 – 1,6 мкм с энергиями до 10 мДж в диапазоне температур от – 40° С до + 60° С. Такие излучатели востребованы как учреждениями Республики Беларусь (Институт физики НАН Беларуси, Белгосуниверситет, ОАО ”Пеленг”, НТЦ ”ЛЭМТ” БелОМО, НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ), так и рядом ведущих предприятий России (”НИИ ”Полюс” им. М.Ф. Стельмаха”, г. Москва, РФ; ОАО ”Конструкторское бюро приборостроения” им. А.Г. Шипунова, г. Тула, РФ; ЗАО ”ЭЛСИ”, г. Великий Новгород, РФ).

2. Оригинальный оптический клеящий состав, защищенный патентом Республики Беларусь № 19502 (опублик. 30.10.2015), используется при создании квантронов мощных твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой. Такие квантроны и ТЛДН разрабатываются и исследуются в Институте физики НАН Беларуси, Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (г. Москва, РФ), ЗАО ”Полупроводниковые приборы” (С.–Петербург, РФ), ОАО ”НПП ”Инжект” (г. Саратов, РФ).

3. Результаты исследований мощного полностью твердотельного ВКР излучателя на основе двухкристального Nd:KGW задающего лазера с диодной накачкой могут найти применение при создании мощных излучателей для спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм с частотами повторения импульсов от 10 Гц и энергией от единиц до десятка мДж. Разработки в данном направлении ведутся в Институте физики НАН Беларуси, НТЦ ”ЛЭМТ” БелОМО, ОАО ”Пеленг”.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Слэб–лазер на эрбиевом стекле с поперечной диодной накачкой / Г.И. Рябцев, М.В. Богданович, А.И. Енжиевский, Л.Л. Тепляшин, А.П. Клищенко, А.В. Пожидаев (Григорьев), М.А. Щемелев, А.Г. Рябцев, А.С. Красковский, С.Н. Титовец, К.В. Юмашев, А.М. Маляревич, О.С. Дымшиц, А.А. Жилин // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75, № 11. – С. 21 – 25.

2. Amplified spontaneous emission induced peculiarities of the passively Q-switched diode pumped erbium laser dynamics / M.V. Bogdanovich, A.V. Grigor'ev, V.V. Kabanov, Y.V. Lebiadok, G.I. Ryabtsev, A.G. Ryabtsev, M.A. Schemelev, A.S. Dementjev, L. Agrawal, A. Bhardwaj // Lithuanian J. of Physics. – 2010. – Vol. 50, No. 4 – P. 413 – 418.

3. Transversally diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser with improved power and spatial characteristics / T.V. Bezyazychnaya, M.V. Bogdanovich, A.V. Grigor'ev, V.V. Kabanov, O.E. Kostik, Y.V. Lebiadok, K.V. Lepchenkov, V.V. Mashko, A.G. Ryabtsev, G.I. Ryabtsev, M.A. Shchemelev, L.L. Teplyashin // Optics Communications. – 2013. – Vol. 308. – P. 26 – 29.

4. Компактный ВКР-лазер на кристалле KGW:Nd с поперечной диодной накачкой / Т.В. Безъязычная, М.В. Богданович, А.В. Григорьев, К.И. Ланцов, Е.В. Лебедок, К.В. Лепченков, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, П.В. Шпак, М.А. Щемелев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 3. – С. 473 – 476.

5. Усиленная люминесценция и паразитные моды генерации в активном элементе YAG:Nd-лазера с поперечной диодной накачкой / М.В. Богданович, А.В. Григорьев, К.И. Ланцов, Е.В. Лебедок, К.В. Лепченков, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, М.А. Щемелев // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 4. – С. 537 – 541.

6. Эффективность поперечной накачки лазерными диодными линейками эрбиевого лазера с пассивной модуляцией добротности / Г.И. Рябцев, М.В. Богданович, А.В. Григорьев, В.В. Кабанов, Е.В. Лебедок, К.В. Лепченков, А.Г. Рябцев, М.А. Щемелев // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82, № 9. – С. 3 – 10.

Статьи в сборниках статей и материалов конференций

7. Энергетические и спектральные характеристики иттербий–эрбиевого лазера с диодной накачкой в широком температурном диапазоне / М.В. Богданович, А. В. Григорьев, А. И. Енжиевский, К. И. Ланцов, К. В.

Лепченков, В.Н. Павловский, А. Г. Рябцев, Г. И. Рябцев, И. Е. Свитенков, В. С. Титовец, М.А. Щемелев, Г. П. Яблонский // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: сборник статей 10-го Белорусско-Российского семинара, Минск, 26–29 мая 2015 г.; Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси; под ред.: И.В. Дулевич, Г.П. Яблонский. – Минск, 2015. – С. 73 – 75.

Патенты

8. Слэб-лазер с диодной накачкой: пат. 4745 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01 S 3/08 / Т.В. Безъязычная, М.В. Богданович, А.И. Енжиевский, А.С. Красковский, В.В. Парашук, А.В. Пожидаев (Григорьев), А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, Л.Л. Тепляшин, С.Н. Титовец, М.А. Щемелев; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № u 20080104; заявл. 14.02.2008; опубл. 30.10.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2008. – № 5. – С. 229.

9. Лазер с диодной накачкой: пат. 5508 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01 S 3/10, Н 01 S 3/11 / Т.В. Безъязычная, М.В. Богданович, О.Н. Жуков, В.В. Кабанов, А.С. Красковский, А.В. Пожидаев (Григорьев), А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, М.А. Щемелев; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № u 20090080; заявл. 03.02.2009; опубл. 30.08.2009 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 4. – С. 242.

10. Способ управления твердотельным лазером с пассивной модуляцией добротности: пат. 14573 Респ. Беларусь, МПК Н 01 S 3/10, Н 01 S 3/11 / Т.В. Безъязычная, М.В. Богданович, А.В. Григорьев, В.В. Кабанов, А.С. Красковский, Г.Т. Микаелян, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, С.Н. Соколов, Л.Л. Тепляшин, М.А. Щемелев; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № a20091224; заявл. 12.08.2009; опубл. 30.06.2011 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 3. – С. 150 – 151.

11. Оптический клеящий состав: пат. 19502 Респ. Беларусь, МПК7 С 09 J 163/10 / Т.В. Безъязычная, М.В. Богданович, А.В. Григорьев, В.В. Кабанов, О.Е. Костик, Е.В. Лебедок, В.В. Машко, А.Г. Рябцев, Г.И. Рябцев, Л.Л. Тепляшин, М.А. Щемелев; заявитель Институт физики НАН Беларуси. – № a 20121746; заявл. 14.12.2012; опубл. 30.10.2015 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2015. – № 5. – С. 64 – 65.

РЭЗІЮМЭ

Грыгор'еў Аляксандр Віктаравіч

Энергетычныя і часавыя характарыстыкі выпраменьвання
цвёрдацельных лазераў спектральнага дыяпазону 1,5–1,6 мкм
з папярочнай дыёднай напампоўкай

Ключавыя словы: цвёрдацельныя лазеры, папярочная дыёдная напампоўка, ўзмоцненая люмінесцэнцыя, умоўна бяспечнае для органаў зроку выпраменьванне.

Мэта дысертацыйнай працы: усталяванне дамінантных механізмаў страт энергіі і распрацоўка метадаў іх мінімізацыі і аптымізацыі ўмоў узбуджэння ў цвёрдацельных лазерах на 1,5 – 1,6 мкм з папярочнай дыёднай напампоўкай на аснове мадэлявання энергетычных і часавых характарыстык і выкарыстанні арыгінальных схем актыўнага элемента і рэзанатара.

Метады даследавання: лікавае мадэляванне ўмоў узбуджэння, энергетычных і часавых параметраў выходнага выпраменьвання цвёрдацельных лазераў, метады спектральнага аналізу, піраэлектрычныя метады вымярэння энергетычных характарыстык выпраменьвання, фотаэлектрычныя метады рэгістрацыі часавых і прасторавых характарыстык лазернага выпраменьвання.

Атрыманыя вынікі. Усталявана, што ўзмоцненая люмінесцэнцыя ў ітэрбій-эрбіевым лазеры з пасіўным мадулятарам дыхтоўнасці прыводзіць да змены часу затрымкі генерацыі і чашчыні імпульсаў генерацыі, пры гэтым змены пікавай магутнасці і працягласці імпульсу малазначныя. Выяўлена, што пры высокіх узроўнях напампоўкі насычэнне інтэнсіўнасці выпраменьвання квантрона задавальнага неадымавага лазера вызначаецца развіццём у актыўным элеменце кольцавых замкнёных мод. Для лазераў з папярочнай дыёднай напампоўкай прапанаваны арыгінальны метады вызначэння аптымальнага ўзаемага размяшчэння дыёдных лінеек і актыўнага элемента. Усталявана, што больш эфектыўнае выкарыстанне напампоўванага аб'ёму актыўнага элемента слэб-канфігурацыі ў параўнанні з цыліндрычным актыўным элементам дазваляе павялічыць энергію ітэрбій-эрбіевага лазера на 35 % і зменшыць працягласць імпульсу на 20 %.

Асноўныя вынікі атрыманы ўпершыню і з'яўляюцца новымі для фізікі цвёрдацельных лазераў з папярочнай дыёднай напампоўкай. Яны могуць быць скарыстаны для стварэння новых тыпаў выпраменьвальнікаў для спектральнага дыяпазону 1,5 – 1,6 мкм. Вынікі, атрыманыя ў дысертацыі, выкарыстоўваліся пры распрацоўцы і вырабе лазераў з дыёднай напампоўкай у Інстытуце фізікі НАН Беларусі, ЗАТ "Паўправадніковыя прыборы" (г. Санкт-Пецярбург, РФ), НТЦ "ЛЭМТ" БЕЛАМА, ЗАТ "ЭЛСИ" (г. Вялікі Ноўгарад, РФ).

РЕЗЮМЕ

Григорьев Александр Викторович

Энергетические и временные характеристики излучения
твердотельных лазеров спектрального диапазона 1,5 – 1,6 мкм
с поперечной диодной накачкой

Ключевые слова: твердотельные лазеры, поперечная диодная накачка, усиленная люминесценция, условно безопасное для органов зрения излучение.

Цель диссертационной работы: установление доминирующих механизмов потерь энергии и разработка методов их минимизации и оптимизации условий возбуждения в твердотельных лазерах на 1,5 – 1,6 мкм с поперечной диодной накачкой на основе моделирования энергетических и временных характеристик и использования оригинальных схем активного элемента и резонатора.

Методы исследования: численное моделирование условий возбуждения, энергетических и временных параметров выходного излучения твердотельных лазеров, методы спектрального анализа, пироэлектрические методы измерения энергетических характеристик излучения, фотоэлектрические методы регистрации временных и пространственных характеристик лазерного излучения.

Полученные результаты. Установлено, что усиленная люминесценция в иттербий-эрбиевом лазере с пассивным модулятором добротности приводит к изменению времени задержки генерации и частоты следования импульсов генерации, при этом изменение пиковой выходной мощности и длительности импульса незначительно. Обнаружено, что при высоких уровнях накачки насыщение интенсивности излучения квантрона задающего неодимового лазера определяется развитием в активном элементе кольцевых замкнутых мод. Для лазеров с поперечной диодной накачкой предложен оригинальный метод определения оптимального взаимного расположения диодных линеек и активного элемента в заданном оптическом резонаторе. Установлено, что более эффективное использование накачиваемого объема активного элемента слаб-конфигурации при зигзагообразном ходе лучей по сравнению с цилиндрическим АЭ позволяет повысить энергию иттербий-эрбиевого лазера на 35 % и снизить длительность импульса на 20 %.

Основные результаты получены впервые и являются новыми для физики твердотельных лазеров с поперечной диодной накачкой. Они могут быть использованы для создания новых типов излучателей, работающих в спектральном диапазоне 1,5 – 1,6 мкм. Результаты, полученные в диссертации, использовались при разработке и изготовлении лазеров с диодной накачкой в Институте физики НАН Беларуси, ЗАО «Полупроводниковые приборы» (г. Санкт-Петербург, РФ), НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО, ЗАО «ЭЛСИ» (г. Великий Новгород, РФ).

SUMMARY

Grigor'ev Alexander Viktorovich

Energy and temporal radiation characteristics of
1.5 – 1.6 μm transversally diode-pumped solid-state lasers

Key words: solid-state lasers, transversal diode pumping, amplified luminescence, eye-safe radiation.

Principal objective of dissertation work: determination of dominant energy loss mechanisms and development of losses minimization and excitation conditions optimization methods for 1.5 – 1.6 μm transversely diode pumped solid-state lasers by modelling of energy and temporal laser characteristics and using the original active element and laser resonator configurations.

Research methods: numerical simulation of the excitation conditions, energy and temporal output radiation parameters of the solid-state lasers, spectral analysis methods, pyroelectric methods of the energy characteristics measurement, photoelectrical methods of temporal and spatial laser radiation characteristics registration.

Data obtained. Amplified luminescence in an ytterbium-erbium laser with a passive Q - modulator is established to result in a change of the generation time delay and the repetition rate of the generation pulses, while the change in the peak output power and the pulse duration is negligible. It was found that at high pump levels, the saturation of the quantron emission intensity of the master neodymium laser is determined by the development of parasitic lasing modes in the active element. An original method for determining the optimal arrangement of the diode arrays and the active element in optical cavity is proposed for transversally diode pumped lasers. It was found that more efficient use of the pumped volume for zig-zag slab active element compared to cylindrical active element leads to 35 % increase of the ytterbium-erbium laser energy and 20 % reduce of the laser pulse duration.

Main results have been obtained for the first time; they are new ones for the physics of the transversally diode-pumped solid-state lasers. Dissertation data can be applied for new types of 1.5 – 1.6 μm spectral region lasers creation. The results obtained have been used during development and manufacturing of diode-pumped lasers at the Institute of Physics of National academy of sciences of Belarus, “ATC – Semiconductor devices” (S.-Petersburg, Russia), Scientific-technical center “LEMT” BelOMA, (Minsk), ZAO “ELSI” (V.Novgorod, Russia).

ГРИГОРЬЕВ Александр Викторович

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРОВ
СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА 1,5 – 1,6 мкм
С ПОПЕРЕЧНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.21 – лазерная физика

Подписано в печать 15 августа 2017 г. Формат 60 x 90/16
Тип бумаги – офсетная. Гарнитура “Times”. Печать: ризография.
Объем: 1,5 усл. печ. л., 1,2 уч.–изд.л.
Тираж 70 экз. Заказ № 12

Государственное научное учреждение “Институт физики
имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси”
220072, Минск, пр. Независимости, 68
Отпечатано на ризографе Института физики НАН Беларуси