

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.373.826:004.942

КРЫЛОВА

Любовь Георгиевна

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ
ФОРМИРОВАНИЯ УСИЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЛАЗЕРАХ С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ**

Автореферат

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

Минск – 2022

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете**.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Буров Леонид Иванович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры общей физики
Белорусского государственного университета.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Григорьева Елена Викторовна,
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры высшей математики
УО «Белорусский государственный
экономический университет»;

Новицкий Денис Викторович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий Центром «Нанопотоника»
ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**Белорусский национальный технический
университет.**

Защита состоится **«16» сентября 2022 года** в **14.00** часов 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.

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

Телефон ученого секретаря 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «26» 05 _____ 2022 года.

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



О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Твердотельные лазеры, в качестве активных сред которых используются соактивированные редкоземельными ионами стекла и кристаллы, вызывают постоянный интерес, что во многом объясняется широким спектром их применения в различных отраслях медицины и технологий. Объем исследований в данной области значителен. Ведется не только поиск и разработка новых активных сред и схем получения лазерной генерации, но и способов повышения эффективности уже существующих систем, оптимизации их структуры и режимов работы.

Широкий выбор лазерных сред ставит перед разработчиками задачи получения генерации с заданными выходными характеристиками, а также оптимизации параметров лазера и лазерного излучения. Поиск наилучших значений для основных параметров лазеров (концентрации примесных ионов, размеров активной среды и добротности резонатора) является многопараметрической задачей, в результате решения которой для достаточно близких по своим значениям параметров, разброс выходных характеристик может существенно различаться. Поэтому разработка критериев создания лазерных систем с заданными габаритными, временными и мощностными характеристиками является актуальной задачей.

На сегодняшний день решение задачи поиска оптимальных значений характеристик лазерной системы и генерируемого излучения во многом сдерживается отсутствием соответствующих теоретических моделей, позволяющих анализировать пространственно-динамические режимы генерации лазерного излучения. Активно используемые модели являются существенно упрощенными и ограниченными, поэтому задачи оптимизации конструкции и режимов работы часто решаются путем простого подбора параметров из общих соображений.

Учитывая сказанное, можно говорить, что задача построения моделей твердотельных лазерных систем, которые бы описывали пространственную эволюцию излучения в резонаторе, является одной из наиболее важных и актуальных в современной лазерной физике. Использование таких пространственно-динамических моделей дает возможность изучить в динамике, какое влияние на процесс формирования излучения оказывает распределенный характер исследуемых величин — интенсивностей излучения накачки и генерации, а также населенностей уровней.

В тоже время, учет достаточно большого числа факторов неизбежно приведет к существенному усложнению моделей и соответствующих расчетов. Поэтому имеет смысл сконцентрировать основное внимание на влияние

неоднородности распределения накачки в активной среде и поисках относительно простых приближений, подходящих для оценки выбора оптимальных параметров лазерной системы, с учетом рассматриваемых явлений (неоднородности накачки).

Модель, которая используется в диссертационной работе, можно рассматривать, как *минимальную* модель, позволяющую учесть основные особенности пространственно-временной динамики излучения лазера.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тематика данной работы соответствует пункту 4 перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 20211 – 2025 годы.

Отдельные части работы выполнялись в рамках республиканских научных программ и проектов:

"Формирование излучения в резонаторе полупроводниковых инжекционных лазеров и твердотельных лазеров с диодной накачкой" (тема в задании 2.01.2 ГКПНН «Фотоника» (2006-2010), № гос. регистрации 20063146);

«Разработка, создание и исследование твердотельных лазеров с диодной накачкой и детекторных структур для регистрации импульсных излучений в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра» (тема в задании 1.2.02 ГПНИ «Электроника и фотоника» (2011-2013), № гос. регистрации 20115396);

«Оптимизация структуры и режимов работы твердотельных лазеров с диодной накачкой и модификации характеристик алмазных детекторных структур при высокотемпературных и радиационных воздействиях» (тема в задании 1.2.06 ГПНИ «Электроника и фотоника» (2014-2015), № гос. регистрации 20142212);

«Оптимизация структуры и режимов работы твердотельных лазеров с диодной накачкой для получения стабильных коротких импульсов с высоким качеством пучка» (тема в задании 1.1.04.1 ГПНИ «Фотоника, опти- и микроэлектроника» (2015-2020), № гос. регистрации 20161880);

"Поляризационная динамика полупроводниковых и твердотельных лазеров", грант БГУ, 2012 год.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка и анализ моделей твердотельных лазеров с учетом пространственной неоднородности

оптических полей накачки и генерации, для определения взаимосвязи технологических параметров лазеров и характеристик генерируемого излучения.

При проведении исследований решались следующие задачи:

– разработка методик численного расчета, позволяющих получить устойчивые решения при моделировании процесса формирования генерируемого излучения в твердотельных лазерах с учетом пространственного распределения населенностей, интенсивностей накачки и генерации;

– расчет эффективности генерации компактного иттербий-эрбиевого лазера, работающего в непрерывном режиме, и оценка возможности достижения оптимальных режимов лазерной генерации с использованием в качестве управляющих параметров длины активной среды и концентрации ионов эрбия и иттербия;

– для режима пассивной модуляции добротности в лазерах на ионах неодима определить влияние коэффициента начального пропускания, длины и концентрации ионов насыщающегося поглотителя, длины лазерного резонатора на эффективность генерации;

- выработка рекомендаций по определению соотношений параметров исследуемых лазерных систем с целью получения оптимальных режимов работы лазерной системы или параметров выходного излучения.

Объектом исследований являлись компактные твердотельные иттербий-эрбиевые и неодимовые лазерные системы на стеклянных матрицах с диодной накачкой, работающие в непрерывном режиме и в режиме модуляции добротности.

Предметом исследований являлись зависимости мощностных и динамических характеристик твердотельных лазеров (выходная пиковая и средняя мощность лазерного излучения, эффективность лазерной генерации, длительность импульса генерации) от параметров резонатора и накачки.

Научная новизна

Продемонстрирована возможность оптимизации эффективности лазерной генерации компактного иттербий-эрбиевого компактного лазера с диодной накачкой путем соответствующего выбора соотношений длины активной среды и концентраций ионов эрбия и иттербия, причем показано, что относительная концентрация ионов эрбия может быть существенно снижена без потери эффективности генерации.

Впервые показано, что в твердотельном неодимовом лазере, работающем в режиме модуляции добротности, при равных значениях

начального пропускания более выгодным оказывается использование более тонких насыщающихся фильтров при той же оптической плотности.

Показано, что в твердотельном неодимовом лазере, работающем в режиме модуляции добротности, увеличение коэффициента отражения выходного зеркала в области 70-95% ведет к резкому росту пиковой мощности и уменьшению длительности импульса при некотором спаде его средней энергии.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование одномерной пространственно-динамической модели для моделирования иттербий-эрбиевых компактных лазеров на стекле с продольной диодной накачкой, работающих в непрерывном режиме генерации, позволяет рассчитать их выходные характеристики с учетом неоднородности распределения энергии накачки вдоль оси резонатора и определить оптимальные значения длины активной среды и концентрации ионов иттербия и эрбия, для которых достигается максимальное значение величины коэффициента усиления и минимальное значение величины пороговой мощности накачки.

2. Для компактного иттербий-эрбиевого лазера на стекле с продольной диодной накачкой, работающего в непрерывном режиме генерации, одномерная пространственно-динамическая модель позволяет определить, что для получения максимальных значений эффективности генерации и минимального значения пороговой мощности накачки наиболее подходящими являются образцы активных сред с концентрацией ионов иттербия порядка $2 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$, длиной порядка 1 мм и отношением концентраций иттербия и эрбия порядка ста.

3. Для компактного *Nd:LSB* лазера с продольной диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности с насыщающимся фильтром *Cr:YAG*, одномерная пространственно-динамическая модель показывает, что при выборе из нескольких фильтров с одинаковым фиксированным начальным пропусканием использование более тонких фильтров с большим значением концентрации ионов хрома влечет за собой увеличение выходной мощности и энергии импульсов, поскольку увеличение концентрации ионов приводит к росту плотности энергии генерации внутри резонатора, соответствующей уровню просветления фильтра.

4. Использование одномерной пространственно-динамической модели для описания компактного *Nd:YAG* лазера с поперечной диодной накачкой, работающего в режима пассивной модуляции добротности с *Cr:YAG* насыщающимся поглотителем, показывает, что минимальная длительность и

максимальная пиковая мощность лазерных импульсов достигаются в определенной, независимой от линейных размеров насыщающегося поглотителя и лазерного резонатора, области мощности накачки.

Личный вклад соискателя ученой степени

Диссертация отражает личный вклад автора в исследования, выполненные в Белорусском государственном университете. Он заключается в непосредственном участии в постановке задач исследований, моделировании лазерных систем, разработке вычислительных алгоритмов, проведении численных экспериментов, а также в интерпретации полученных результатов.

Научный руководитель кандидат физико-математических наук, доцент Л.И. Буров определял основные цели, формулировал приоритетные задачи исследования и непосредственно участвовал в интерпретации полученных результатов. Соавторы Белов М.А. и Крылов Г.Г. содействовали в разработке параллельных вычислительных алгоритмов для расчётов на суперкомпьютерах семейства СКИФ-К1000-05, а также принимали участие в обсуждении некоторых полученных результатов моделирования.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты, представленные в настоящей диссертации, докладывались на следующих конференциях:

«63 научная конференция студентов и аспирантов Белгосуниверситета» (Минск, 23-26 мая 2006 г.); «IX Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика. Электроника. Фотоника. Биофизика» (Украина, Харьков, 1-3 декабря 2009 г.); XVI Annual Seminar “Nonlinear Phenomena in Complex Systems” (Минск, 19-22 мая 2009 г.); Третья Международная научная конференция «Суперкомпьютерные системы и их применение SSA 2010» (Минск, 25-27 мая 2010 г.); XV International Conference-School “Foundations & Advances in Nonlinear Science” (Минск, 20-23 сентября 2010 г.); 54, 56 Международные студенческие научные конференции “Open Readings 2011”, “Open Readings 2013” (Вильнюс, Литва, 17-19 марта 2011 г.; 20-23 марта 2013 г.); XIX Республиканская научная конференция «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 19-20 апреля 2011 г.); “11th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics” (Харьков, 29 ноября – 01 декабря 2011 г.); 20th International Conference "Foundations & Advances in Nonlinear Science" и 5nd International Symposium "Advances in Nonlinear Photonics" (Минск, 28 сентября – 02 октября 2020 г.); научные семинары кафедры общей физики физического факультета БГУ.

Результаты диссертации внедрены в образовательный процесс БГУ (имеется 1 акт о внедрении).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертации опубликованы в 14 научных работах, из них 5 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,1 авторского листа), 7 - статьи в сборниках материалов научных конференций, 2 тезисов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трёх глав, заключения, библиографического списка и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 117 страниц. Диссертация содержит 31 рисунок на 30 страницах, 3 таблицы на 3 страницах, 1 приложение на 2 страницах. Библиографический список содержит 174 наименования, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Глава 1 посвящена анализу литературы по современным твердотельным лазерным системам, основным теоретическим моделям, описывающим процесс формирования излучения генерации, и подходам к описанию лазерной генерации в таких системах. Изучение литературы показало, что подавляющая часть используемых моделей является точечными, то есть, оперирующими величинами, усредненными по объему активной среды или по объему резонатора, однако такие модели малоэффективны для целей оптимизации.

Для корректного описания динамических режимов работы твердотельных лазеров и решения задач оптимизации параметров излучения необходимо использовать лазерные модели, учитывающие неоднородность пространственного распределения населенности, излучения накачки и генерации внутри лазерной системы. В этом отношении наиболее простой является одномерная пространственно-динамическая модель (в англоязычной литературе *travelling wave model approximation*), которую можно рассматривать как *минимальную*, но позволяющую учесть основные особенности пространственно-временной динамики излучения лазера. Для такой модели система уравнений в частных производных, описывающая динамику излучения и учитывающая наличие пространственного распределения величин вдоль оси резонатора совместно с начальными и граничными условиями, будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\partial f^{\pm}(x,t)}{\partial t} \pm v \frac{\partial f^{\pm}(x,t)}{\partial x} = v (k_A(x,t) - k_L) f^{\pm}(x,t) + R_{sp}(x,t), \quad (1)$$

$$f^+(0,t) = r_1 f^-(0,t); f^-(L_{rez},t) = r_2 f^+(L_{rez},t); f^{\pm}(x,0) = 0,$$

где f^{\pm} - плотности потоков фотонов, распространяющихся в положительном (+) и отрицательном (-) направлениях оси x , v - скорость света в среде, k_A - коэффициент усиления, k_L - коэффициент внутренних потерь (потери на зеркалах учитываются в граничных условиях), r_1, r_2 - коэффициенты отражения входного и выходного зеркал соответственно, R_{sp} - коэффициент, учитывающий вклад спонтанного излучения в излучение генерации, t - время, x - координата вдоль главной оптической оси резонатора.

Далее обсуждаются детали известных численных методов решения системы уравнений (1), формулируются недостатки существующих подходов к численному анализу твердотельных лазерных систем и определяются возможные направления их преодоления, формулируя цели и задачи, связанные с вычислительными аспектами исследования.

В главе 2 представлены результаты теоретических исследований выходных характеристик лазерного излучения компактных лазеров на основе $Yb:Er$ -фосфатных стекол. Система уравнений (1) дополнялась системой ОДУ для описания динамики населенностей уровней иттербия и эрбия. Для описания лазерной динамики был разработан комбинированный метод расчета, основанный на объединении метода бегущей волны, аналитического решения волнового уравнения и использовании логарифмов интенсивностей в качестве переменных. Такой подход обеспечил гладкость численного решения и позволил провести численное моделирование динамики лазерной системы с выходом на стационарные значения.

На основе полученного решения установлено, что зависимость пороговой мощности накачки от концентрации ионов иттербия и эрбия имеет четко выраженный минимум (рисунок 1 а, б), значения которого растут по мере возрастания длины активной среды, а его положение смещается в область меньших концентраций. Тем не менее, для широкого диапазона значений длины активной среды (0.7 – 3.0 мм) зависимость пороговой мощности $P_{пор}$ от концентрации ионов иттербия N_{Yb} в области минимума является довольно слабой (рисунок 1 а). Похожая ситуация наблюдается и в зависимости $P_{пор}$ от концентрации ионов эрбия N_{Er} (рисунок 1 б), но в этом случае величина смещения положения минимума оказывается существенно меньше.

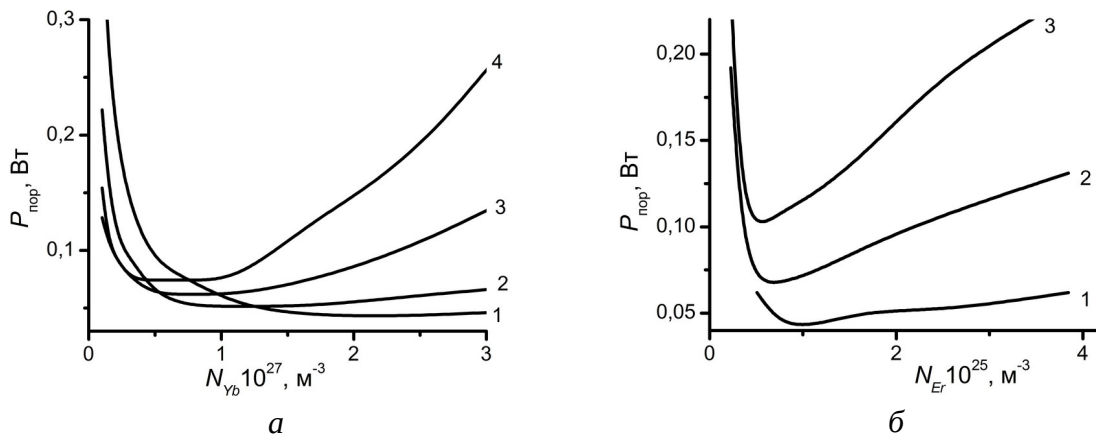


Рисунок 1. – Зависимость пороговой мощности накачки от концентрации ионов иттербия N_{Yb} (а) и эрбия N_{Er} (б) для различных значений длины активной среды L : (а) $N_{Er} = 1.4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $L = 0.7(1); 1.6(2); 3.0(3); 4.5(4)$ мм; (б) $N_{Yb} = 1.6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$, $L = 1.3(1); 3.0(2); 4.5(3)$ мм

Данный факт позволяет сделать вывод о том, что значения концентраций ионов иттербия и эрбия не являются критическими для получения излучения с низкими пороговыми значениями мощности накачки. Несколько иную ситуацию демонстрирует зависимость пороговой мощности накачки $P_{\text{пор}}$ от длины активной среды (рисунок 2 а, б), которая сдвинута в область малых значений длин активной среды, причем минимальное значение пороговой мощности соответствует значениям $L \sim 1-2$ мм.

Что касается зависимости эффективности генерации g от концентрации ионов иттербия N_{Yb} (рисунок 3а) то здесь имеет место максимум, который приобретает более выраженный характер при возрастании длины активной среды L , причем его положение постоянно смещается в область меньших концентраций N_{Yb} , а значение сначала достигает некоего максимального значения, а затем начинает медленно спадать. Характерно, что область достижения максимума для g примерно соответствуют области достижения минимума для пороговой мощности накачки, что создает возможность выбора оптимальных значений.

Для зависимости g от концентрации ионов эрбия N_{Er} (рисунок 3б) характерен достаточно быстрый выход величины g на некоторое стационарное значение, которое быстро растет с увеличением длины активной среды L , достигая максимального значения в области ~ 4.5 мм, а затем начинает спадать.

Такое поведение параметра g связано с конечной величиной плотности энергии в единице объема активной среды (при заданном уровне накачки), которая вследствие переноса может быть передана ионам эрбия.

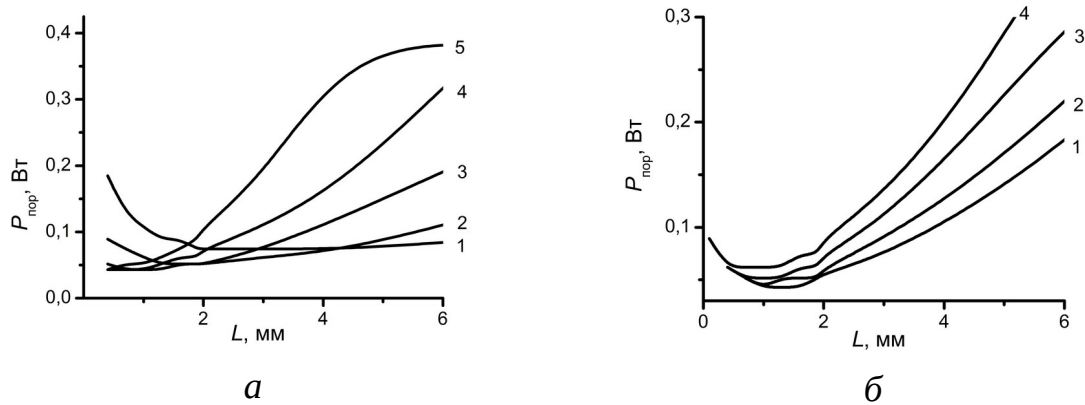


Рисунок 2. – Зависимость пороговой мощности накачки от длины активной среды L для различных значений концентрации ионов иттербия N_{Yb} (а) и эрбия N_{Er} (б):

(а) $N_{Er} = 1.4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; (б) $N_{Yb} = 1.6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$

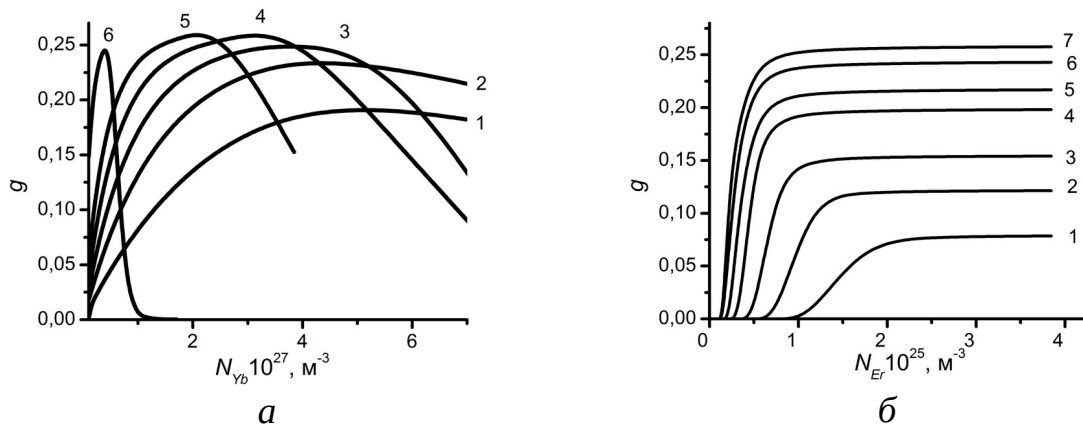


Рисунок 3. – Зависимость дифференциального коэффициента усиления g от концентрации ионов иттербия N_{Yb} (а) и эрбия N_{Er} (б) для различных значений длины активной среды L :

(а) $N_{Er} = 1.4 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, $L = 0.7(1); 1.3(2); 2.0(3); 3.0(4); 4.5(5); 15.0(6)$ мм;

(б) $N_{Yb} = 1.6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$, $L = 0.4(1); 0.7(2); 1.0(3); 1.6(4); 2.0(5); 3.0(6); 4.5(7)$ мм

Поэтому после достижения некоторого критического значения дальнейшее увеличение плотности ионов эрбия не приводит к росту интенсивности усиленного излучения. Следует отметить, что для области $L \sim 1$ мм значения, при которых параметр g выходит на стационарное значение, примерно соответствует значениям N_{Er} , при которых наблюдается минимум $P_{пор}$. Следует отметить, что нет точного совпадения значений N_{Er} для достижения максимума g и минимума $P_{пор}$, однако плавный ход зависимостей в этих областях позволяет решать задачу оптимизации.

В частности, для компактного $Yb:Er$ лазера образцы с концентрацией ионов иттербия в области $2 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ и длиной порядка 1 мм оказываются

наиболее подходящими с точки зрения получения излучения с оптимальным соотношением эффективности генерации и минимального значения пороговой мощности накачки.

Анализ результатов расчета показывает, что использование образцов с большими значениями N_{yb} (например, $4 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$) пригодны для более коротких (0.3 – 0.6 мм) сред, но при этом возрастают пороговые значения и, соответственно, тепловые потери. Поэтому более приемлемым является использование более низких концентраций в области $1.5 - 2.0 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$. Однако, при этом используемое на практике соотношение между концентрациями ионов эрбия и иттербия $N_{yb}/N_{er} \sim 15-20$ является несколько заниженным и для компактных лазеров должно лежать в диапазоне от 80-140 для длин активной среды в области от 0.4 до 1 мм с монотонным возрастанием до значений 200-250 для области 3-4 мм.

Обнаруженные эффекты имеют достаточно простое физическое истолкование. Расчеты показывают, что характер поглощения излучения накачки близко к бугеровскому. В области малых длин активной среды возрастание последней ведет к увеличению величины поглощенной энергии и области усиления, что сопровождается ростом эффективности генерации и падением пороговой мощности. При дальнейшем увеличении длины активной среды до некоторой критической величины L_c мы можем достичь условия, когда мощность накачки вследствие поглощения падает настолько, что у выходного зеркала выполняется условие прозрачности, то есть локальный коэффициент усиления будет равен коэффициенту внутренних потерь. Теперь при увеличении длины $L > L_c$ образуется пассивная область, в которой усиления уже нет, а есть только потери, что приводит как к росту пороговой мощности накачки, так и снижению эффективности генерации.

Рассмотренная интерпретация может быть положена в основу приближенной оценки оптимального соотношения концентрации ионов иттербия и длины активной среды. Ее сопоставление с данными численных расчетов говорят о хорошем согласовании в пределах 10 – 15 %.

Глава 3 посвящается применению пространственно-динамической модели к описанию режима модуляции добротности в неодимовом лазере с поперечной и продольной диодной накачкой.

Моделирование режима модуляции добротности проводилось для двух различных лазеров: для моделирования лазера с поперечной накачкой был выбран $Nd:YAG$ лазер с $Cr:YAG$ насыщающимся фильтром, а для моделирования лазера с продольной накачкой использовался $Nd:LSB$ лазер с $Cr:YAG$ фильтром. Такой выбор связан с тем, что по данным лазерным

системам имелся, во-первых, наиболее полный набор значений параметров, а во-вторых, определенное количество экспериментальных результатов для сравнения. Система уравнений, описывающая лазерную динамику, представляла собой совокупность уравнений (1) для плотностей потоков фотонов двух встречных волн, распространяющихся вдоль оси резонатора и балансных уравнений для коэффициентов усиления в активной среде и коэффициента поглощения в насыщающемся поглотителе, приведенных к безразмерному виду.

На рисунках 4 и 5 приведены результаты моделирования для случая продольной накачки лазера. Точечная модель утверждает, что единственным параметром фильтра, определяющим характеристики режима пассивной модуляции добротности является значение коэффициента пропускания T насыщающегося фильтра. Как показывает численное моделирование, эта величина не является его универсальной характеристикой лазера, поскольку для одних и тех же значений T использование более тонких фильтров с большей концентрацией ионов хрома оказывается более выгодным с точки зрения получения более мощных импульсов, хотя при этом будет увеличиваться и длительность получаемых импульсов (рисунок 4 а, б). То есть, для получения более мощных и коротких импульсов следует брать более тонкий фильтр ([Formulized analytical technique for gain characteristics of phosphate glass Er^{3+}/Yb^{3+} co-doped waveguide amplifiers / Y.-H. Wang [et. al.] // Optica Applicata. – 2008. – Vol. 38, iss. 2. – P. 329–339.]), но длительность импульсов при этом будет увеличиваться.

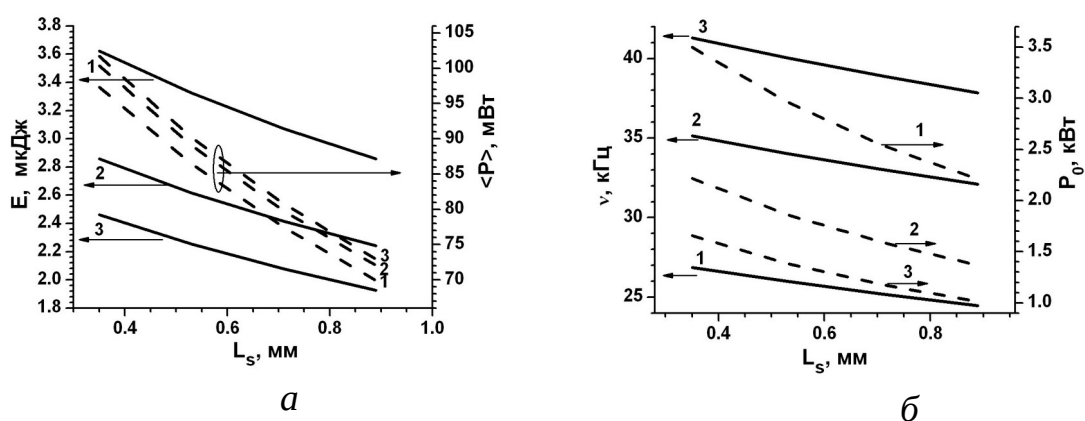


Рисунок 4. – Зависимости выходных характеристик лазера от длины насыщающегося фильтра: (а) зависимости средней выходной мощности (сплошная линия) и энергии импульса (сплошная линия) от длины насыщающегося фильтра; (б) зависимости частоты повторения импульсов (сплошная линия) и пиковой мощности (пунктирная линия) от длины насыщающегося фильтра ($T = 0.83(1)$; $0.87(2)$; $0.89(3)$) для $Nd:LSB$ лазера с $Cr:YAG$ насыщающимся фильтром и продольной накачкой

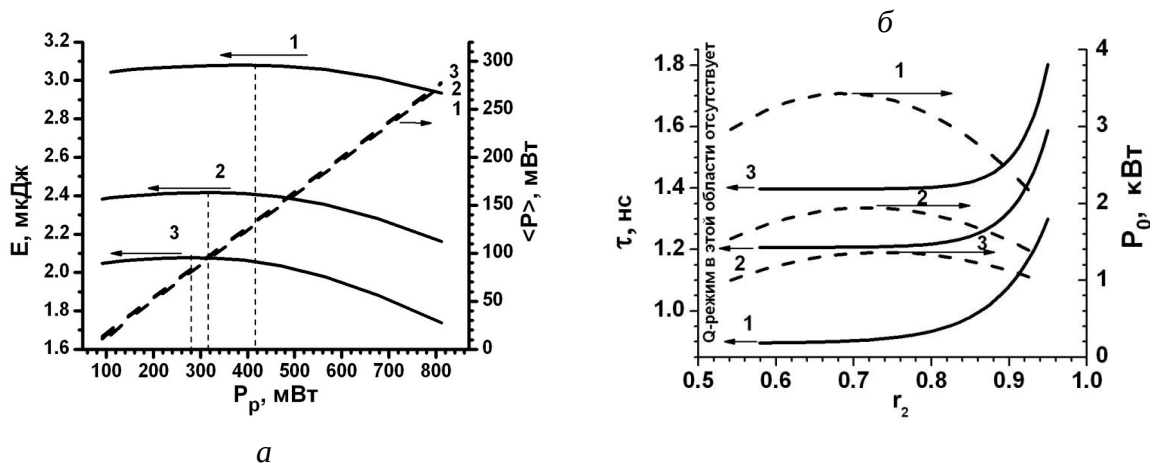


Рисунок 5. – Зависимости выходных характеристик лазера от мощности накачки и коэффициента отражения выходного зеркала: (а) средняя выходная мощность (пунктирная линия) и энергия импульса (сплошная линия) от мощности накачки для различных коэффициентов начального пропускания ($L_s = 0.71$ мм, $L_g = 0.124$ см, $r_2 = 0.9$, $T = 0.83(1)$; $0.87(2)$; $0.89(3)$); (б) длительность импульса (сплошная линия) и пиковая мощность импульса (пунктирная линия) от коэффициента отражения выходного зеркала r_2 для случая различных коэффициентов начального пропускания T ($P_p = 270$ мВт, $L_g = 0.124$ см, $L_s = 0.71$ мм, $T = 0.83(1)$; $0.87(2)$; $0.89(3)$)

Дело в том, что при использовании более тонких по толщине фильтров, увеличение концентрации ионов приводит к росту коэффициента поглощения, что сопровождается увеличением плотности энергии генерации внутри резонатора, соответствующей уровню просветления фильтра. При увеличении начального пропускания в диапазоне 0.83-0.89 численный расчет дает незначительный (менее 1%) рост средней выходной мощности (Рисунок 4 а). Средняя выходная мощность при мощности накачки в $P_p = 800$ мВт составляет около 280 мВт, то есть эффективность генерации g составляет около 37% для всех трех коэффициентов пропускания. В работе Federighi, M. [The effect of pair-induced energy transfer on the performance of silica waveguide amplifiers with high $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ concentrations / M. Federighi, F. Di Pasquale // IEEE Photonics Technology Lett. – 1995. – Vol. 7, iss. 3. – P. 303–305] приводятся экспериментальные зависимости для различных коэффициентов отражения выходного зеркала (в том числе 0.89 и 0.91). Оценка эффективности генерации g дает значение приблизительно 38 – 40%, и эта величина практически не зависит от значения величины T , что хорошо совпадает с теоретически рассчитанными результатами. Зависимость энергии импульса (рисунок 5а) от мощности накачки имеет некоторый максимум, прослеживаемый как экспериментально, так и теоретически. При увеличении начального

пропускания величина энергии импульса будет уменьшаться, а максимум зависимости будет смещаться в область меньших накачек. Так, например, численное моделирование для $T=0.89$ показывает максимальное значение энергии импульса около 2.1 мДж, которое достигается при мощности накачки 400 мВт. Вместе с тем, в эксперименте эта величина составляла около 2.5 мДж. Таким образом, можно сказать, что наблюдается не только хорошее качественное согласование с экспериментом, но и количественные показатели оказываются достаточно близкими.

Интересный результат получается для зависимостей длительности импульса и пиковой мощности от коэффициента отражения выходного зеркала для случая различных значений коэффициента начального пропускания T (рисунок 5 б). Как показал численный расчет, длительность импульсов оказывается приблизительно постоянной для достаточно широкого диапазона значений r_2 . При этом зависимость пиковой мощности от r_2 имеет максимум в области значений 0.68 – 0.75. Таким образом, изменяя значение r_2 можно получить одновременно короткий и мощный импульс.

В случае поперечной накачки лазера, имеется возможность получения одновременно мощного и короткого импульса, причем оптимальное соотношение пиковой мощности и длительности импульса будет сохраняться для некоторого диапазона мощностей накачки, как это показано на рисунке 6. Подавляющее большинство экспериментов выполнены для относительно небольшого превышения пороговых значений мощности накачки и дают практически линейную зависимость, хотя в работе [On the performance of short pulse Nd^{3+} :LSB microchip lasers / M. B. Danailov [et. al.] // Appl. Physics B : Lasers and Optics. – 2001. – Vol. 73, iss. 7. – P. 671–676] отмечается нелинейный загиб в области больших накачек, а для лазера на основе $Nd:YLF$ лазера с насыщающимся фильтром SESAM на монослоях графена (An $Nd:YLF$ laser Q-switched by a monolayer-graphene saturable-absorber mirror / P. Matia-Hernando [et.al.] // Laser Phys.– 2013.– Vol. 23. – P. 025003-5) наличие такого максимума обнаружено в явном виде. Для длительности выходного импульса от мощности накачки (рисунок 6б) наблюдается обратная зависимость, то есть по мере увеличения P длительность сначала падает и достигает минимальных значений в области соответствующей максимуму пиковой мощности. Похожее совпадение областей максимума выходной мощности и минимума длительности наблюдается и в работе [Effects of Yb^{3+} and Er^{3+} concentrations and doping procedure on excitation transfer efficiency in Er - Yb doped phosphosilicate fibers / M. A. Melkumov [et. al.] // Inorganic Materials. – 2010. – Vol. 46, iss. 3. – P. 299–303].

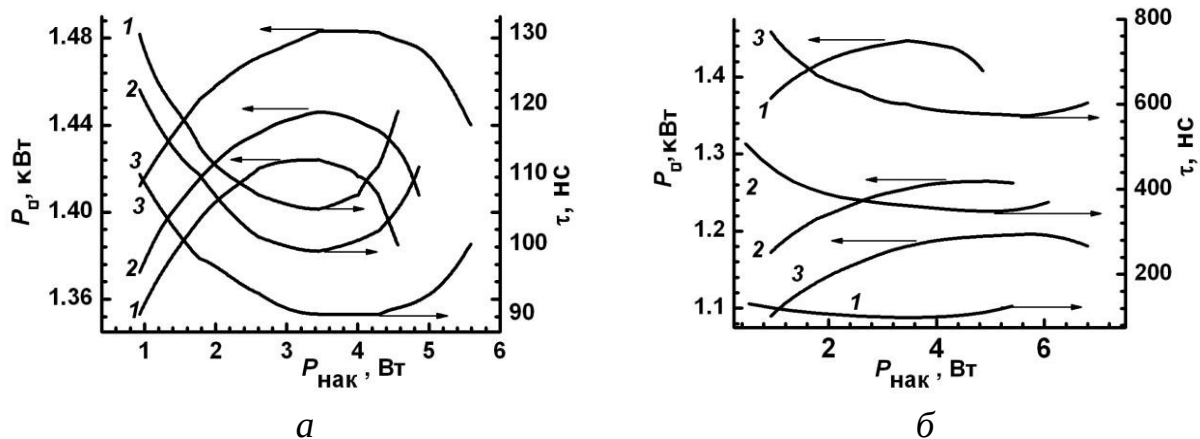


Рисунок 6. – Зависимость величины пиковой мощности выходного излучения и длительности импульса от мощности накачки:

(а) $L_3=0.1\text{ м}$, $L_s=2.4$ (1); 2.5 (2); 2.7 (3) мм; (б) $L_s=0.25\text{ мм}$, $L_3=0.1$ (1); 0.55 (2); 1.04 (3) м

При увеличении общей длины резонатора путем отодвигания выходного зеркала будет наблюдаться следующая картина: максимум пиковой мощности и минимум длительности импульса генерации будут совпадать. При этом с увеличением длины резонатора данные экстремумы будут смещаться в сторону больших значений накачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе:

1. Выполнено численное моделирование динамических режимов ряда лазеров (Yb-Er лазера на фосфатном стекле в непрерывном режиме работы; Nd:LSB и Nd:YAG лазеры с Cr:YAG насыщающимся фильтром в режиме модуляции добротности); определены зависимости пороговой мощности от длины активной среды и концентраций ионов эрбия и иттербия, выходной мощности генерации от мощности накачки для непрерывного режима работы компактного иттербий-эрбиевого лазера с продольной диодной накачкой [1, 2; 7; 8; 9; 10; 11; 14], а также зависимости средней выходной мощности, пиковой мощности, энергии импульса, длительности и частоты повторения импульсов в неодимовых лазерах с насыщающимся фильтром от различных входных характеристик лазера (концентрация ионов и длина активной среды, длина и добротности резонатора, начальное пропускание насыщающегося поглотителя) [3–5; 12; 13].
2. Показано, что для иттербий-эрбиевого лазера на фосфатном стекле, работающего в непрерывном режиме генерации, зависимости пороговой

мощности накачки и эффективности генерации от концентрации ионов иттербия и длины активной среды имеют локальные экстремумы что делает возможным подбор оптимального сочетания концентрации ионов иттербия и длины активной среды для получения минимальных пороговых значений накачки и максимальной эффективности генерации. Задача подбора несколько упрощается, поскольку зависимость эффективности генерации от концентрации ионов эрбия в области минимума имеет очень плавный характер (например, для $L=1.3$ мм диапазон отклонения g в пределах составляет порядка 5% для $3.6 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-1} < N_{yb} < 5.3 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-1}$). В частности, для компактного иттербий-эрбиевого лазера оптимальным является активная среда с концентрацией ионов иттербия в области $2 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$ и длиной порядка 1 мм [1; 2; 6, 8; 11; 13].

3. На основе результатов численного моделирования показано [2], что для компактных иттербий-эрбиевых лазеров с продольной диодной накачкой, работающих в непрерывном режиме генерации, наблюдается аналог эффекта насыщения, когда превышение некоторой критической концентрации ионов эрбия уже не ведет к увеличению эффективности генерации. На основе полученных данных можно считать, что оптимальным соотношением концентраций ионов иттербия к ионам эрбия является значение в диапазоне 80-140 для длин активной среды в области от 0.4 до 3 мм.

4. Сформулирован критерий приближенной оценки оптимального соотношения концентрации ионов иттербия и длины активной среды, основанный на предположении, что на оптимальной длине активной среды у выходного зеркала реализуется условие прозрачности [5], то есть локальный коэффициент усиления будет равен коэффициенту внутренних потерь. Ее сопоставление с данными численных расчетов говорят о хорошем согласовании в пределах 10 – 15 %.

5. Получены зависимости пиковой мощности и длительности импульсов от коэффициента отражения выходного зеркала в режиме модуляции добротности с продольной лазерной накачкой [4]. Показано, что зависимость пиковой мощности имеет максимум, для которого может быть указано значение коэффициента отражения зеркала r_2 , обеспечивающее минимальную длительность импульса. Так для мощности накачки 270 мВт и длины фильтра 0.7 мм длительность генерируемых импульсов будет минимальной при изменении коэффициента отражения выходного зеркала в диапазоне значений от 0.6 до 0.8, а максимальное значение пиковой мощности для различных коэффициентов начального пропускания (0.83; 0.87; 0.89) при этом будет составлять (3.4 кВт; 2 кВт; 1.2 кВт) соответственно.

6. Показано [4, 12], что для *Nd:LSB* лазера с *Cr:YAG* насыщающимся фильтром, работающем в режиме модуляции добротности, коэффициент начального про-пускания фильтра не является универсальной характеристикой лазера с насыщающим поглотителем, как это следует из точечной модели лазера. Выходные характеристики будут различны для различного соотношения длины и концентрации ионов насыщающего поглотителя при сохранении постоянным начального пропускания. Для коэффициентов начального пропускания из диапазона 0.83 – 0.89 использование более тонких фильтров (0.4 – 0.9 мм) с большей концентрацией ионов хрома оказывается более выгодным с точки зрения получения более мощных импульсов, хотя при этом будет также увеличиваться длительность получаемых импульсов.

7. Получены зависимости пиковой мощности и длительности импульсов от мощности накачки для различных значений длины насыщающегося поглотителя (в диапазоне 2.4 – 2.7 мм) в случае поперечной накачки *Nd:YAG* лазера [3]. Показано, что условия получения минимума длительности импульса и максимума пиковой мощности в этом режиме совпадают.

8. В режиме пассивной модуляции добротности в *Nd:YAG* лазере с поперечной накачкой можно получить одновременно мощный и короткий импульс как для компактного лазера (все внутрирезонаторные элементы расположены вплотную друг к другу и к зеркалам), так и для лазера с протяженным резонатором (длиной до 1.4 м) [3].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в диссертационной работе результаты могут найти практическое применение в следующих областях лазерной техники: для разработки и изготовления малобаритных лазерных систем с высокой эффективностью работы (компактных лазерах); для разработки и изготовления твердотельных лазеров с диодной накачкой с повышенными значениями энергосъема и повышенной эффективностью выходных характеристик излучения. Предложенный приближенный критерий оптимального соотношения концентрации ионов иттербия и длины активной среды является простым по сути и удобен для практического использования. Результаты данной диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры компьютерного моделирования физического факультета БГУ (имеется акт о внедрении).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Burov, L. I. Influence of spatial inhomogeneity of pump energy distribution on output characteristics of Yb:Er laser with end pump / L. I. Burov, G. G. Krylov, L. G. Krylova // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2010. – Vol. 13, № 4. – P. 368–380.

2. Буров, Л. И. Оптимизация параметров Yb- Er лазерного микрочипа / Л. И. Буров, Л. Г. Крылова // *Журн. приклад. спектроскопии*. – 2012. – Т. 79, № 3. – С. 397–402.

3. Белов, М. А. Пространственно-динамическая модель для описания формирования излучения в твердотельном лазере с пассивным просветляющимся фильтром / М. А. Белов, Л. И. Буров, Л. Г. Крылова // *Вестн. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. – 2014. – № 1. – С. 25–31.

4. Belov, M. A. Influence of the Cr⁴⁺: YAG saturable absorber parameters on output characteristics of the Nd³⁺: LSB laser in Q-switched regime / M. A. Belov, L. I. Burov, L. G. Krylova // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2015. – Vol. 18, № 2. – P. 140–148.

5. Burov, L. I. Optimization of the Parameters of a Compact Laser Microchip Based on Nd:LSB with Cr:YAG Saturable Absorber / L. I. Burov and L. G. Krylova // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. – 2020. – Vol. 23, iss. 4. – P. 442–448.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

6. Крылова, Л. Г. Влияние спонтанного испускания на пороговые и динамические характеристики Yb-Er лазера с диодной накачкой / Л. Г. Крылова // *Сборник работ 63-й научной конференции студентов и аспирантов Белгосуниверситета, Минск, 23–26 мая 2006 г. : в 3 ч. / [редкол.: А. Г. Захаров (отв. ред.) и др.]*. – Минск, 2006. – Ч. 1. – С. 154–157.

7. Burov, L. I. Distributed Model of Erbium/Ytterbium Laser with Energy Transfer: Simulation of Steady State Regime / L. I. Burov, G. G. Krylov, L. G. Krylova // *Nonlinear Dynamics and Applications*. – 2009. – Vol.16:

XVI Annual Seminar Nonlinear Phenomena in Complex Systems, Minsk, 19-22 May 2009. – Минск, 2009. – P. 68–75.

8. Крылова, Л. Г. Использование суперкомпьютера в задачах оптимизации мощностных и пороговых характеристик твердотельных лазеров / Л. Г. Крылова, М. А. Белов // Суперкомпьютерные системы и их применение. SSA' 2010 : Доклады третьей Междунар. науч. конф., Минск, 25–27 мая 2010 г., в 2 т. / Нац. акад. наук Беларуси, Объед. ин-т пробл. информатики ; [науч. ред. В. В. Анищенко]. – Минск, 2010. – Т. 2. – С. 133–137.

9. Burov, L. I. Solutions' matching method for simulation of power and dynamical characteristics of diode pumped Er-Yb laser / L. I. Burov, L. G. Krylova , G. G. Krylov // Foundations & Advances in Nonlinear Science : proc. of 15th Intern. conf.-school, Minsk, Belarus, 20–23 Sept. 2010 / ed.: V. I. Kuvshinov, G. G. Krylov. – Minsk, 2010. – P. 114–122.

10. Крылова, Л.Г. Пороговые и выходные характеристики твердотельного лазера с плоскопараллельным резонатором и продольной накачкой [Электронный ресурс] / Л.Г. Крылова // Физика конденсированного состояния: материалы XIX респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 19-20 апр. 2011 г. / ГрГУ: ред.кол.: Е.А.Ровба [и др.]. - Гродно: ГрГУ, 2011. - С. 51-53. - Режим доступа: <https://elib.grsu.by/katalog/153732-301793.pdf#page=52> . - Дата доступа: 1.02.2020.

11. Krylova, L. G. Optimization of Short Er-Yb co-doped Diode Pumped Laser / L. G. Krylova // Open Readings 2011 : programm and abstracts of the 54th scientific conf. for young students of physics and natural sciences, Vilnius, Lithuania, March 17– 19, 2011. / Viln. Univ. – Vilnius, 2011. – P. 130–131.

12. Belov, M. Application of the time-space distributed model for the description of Q-switched regime in solid-state lasers with a saturable absorber / M. Belov, L. Burov, L. Krylova // J. of Physics : Conference Series. – 2014. – Vol. 541, № 1. – № 012051.

Тезисы

13. Крылова, Л. Г. Моделирование динамики формирования излучения генерации в Yb-Er- лазере на фосфатном стекле с продольной диодной накачкой / Л. Г. Крылова // Материалы 11 Международного молодежного форма «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, 10 – 12 апреля 2007 г. / Мин.обр. и науки Укр.; нац. у–т радиоэлектроники. – Харьков, 2007. – С. 214.

14. Крылова, Л. Г. Анализ стационарного режима для распределенной модели иттербий-эрбиевого лазера с использованием адиабатического исключения переменных / Л. Г. Крылова // IX Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика, электроника, фотоника и биофизика», Харьков, 1-3 декабря, 2009 г. – Харьков, 2009. – С. 78.



РЕЗЮМЕ

Крылова Любовь Георгиевна

«Пространственно-динамические модели формирования усиленного излучения в твердотельных лазерах с диодной накачкой»

Ключевые слова: лазерное излучение, твердотельный лазер, оптимизация параметров, распределенная модель лазера.

Цель работы - обобщение современных моделей твердотельных лазеров на учет пространственной неоднородности полей накачки и излучения и выяснение параметров лазерных систем, существенно влияющих на их режимы работы, мощностные и динамические характеристики.

Методы исследования и использованная аппаратура. Численное моделирование динамических характеристик с использованием распределенной модели. Использованная аппаратура - персональные компьютеры, суперкомпьютер СКИФ.

Полученные результаты и их новизна. Установлено, что для компактного иттербий-эрбиевого лазера с продольной диодной накачкой, работающего в непрерывном режиме генерации, существует возможность оптимизации эффективности генерации, с использованием в качестве варьируемых параметров как длины активной среды, так и концентрации ионов активной среды N_{Yb} и N_{Er} , причем концентрация ионов эрбия может быть существенно снижена. Показано, что для компактного лазера на ионах неодима с продольной диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности, коэффициент начального пропускания T насыщающегося фильтра не является универсальной характеристикой, поскольку при одной и той же величине T использование более тонких фильтров с большей концентрацией ионов хрома оказывается более выгодным. Более того, выбирая коэффициент отражения выходного зеркала в области 0.6 – 0.8 можно получить максимум пиковой выходной мощности при сохраняющейся длительности импульса. Все результаты получены впервые и являются новыми для лазерной физики. Ряд полученных в диссертации данных внедрен в учебный процесс.

Рекомендации по использованию. Полученные результаты могут найти широкое применение в науке и технике для разработки и исследования твердотельных лазеров с диодной накачкой и составным резонатором.

Область применения. Научно-технические отрасли создания твердотельных лазерных систем.

РЭЗЮМЭ

Крылова Любоў Георгіеўна

«Прасторава-дынамічныя мадэлі фарміравання ўзмоцненага выпраменьвання ў цвёрдацельных лазерах з дыёднай накачкай»

Ключавыя словы: лазернае выпраменьванне, твэдацельны лазер, аптымізацыя параметраў, размеркаваная мадэль лазера.

Мэта працы - абагульненне сучасных мадэляў цвёрдацельных лазераў на ўлік прасторавай неаднастайнасці палёў накачкі і выпраменьвання і высвятленне параметраў лазерных сістэм, якія істотна ўплываюць на іх рэжымы працы, магутнасныя і дынамічныя характарыстыкі.

Метады даследавання і скарыстаная апаратура. Лікавае мадэляванне дынамічных характарыстык з выкарыстаннем размеркаванай мадэлі. Скарыстаная апаратура - персанальныя кампутары, суперкампутар СКІФ.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Устаноўлена, што для кампактнага ітэрбій-эрбіевага лазера з падоўжнай дыёднай напампоўкай, які працуе ў бесперапынным рэжыме генерацыі, існуе магчымасць аптымізацыі эфектыўнасці генерацыі, з выкарыстаннем у якасці вар'іраваных параметраў як даўжыні актыўнага асяроддзя, так і канцэнтрацыі іёнаў актыўнага асяроддзя Nd^{3+} і Er^{3+} , прычым канцэнтрацыя іёнаў эрбія можа быць істотна паніжаная. Паказана, што для кампактнага лазера на іёнах неадому з падоўжнай дыёднай напампоўкай, які працуе ў рэжыме мадуляцыі дыхтоўнасці, каэфіцыент пачатковага прапускання T які насычаецца фільтра не з'яўляецца ўніверсальнай характарыстыкай, паколькі пры адной і той жа велічыні T выкарыстанне больш тонкіх фільтраў з большай канцэнтрацыяй іёнаў хрому апыняецца больш выгадным. Больш за тое, выбіраючы каэфіцыент адлюстравання выходнага люстэрка ў вобласці 0.6 – 0.8 можна атрымаць максімум пікавай выходнай магутнасці пры якая захоўваецца працягласці імпульсу. Усе вынікі атрыманы ўпершыню і з'яўляюцца новымі для лазернай фізікі. Шэраг атрыманых у дысертацыі даных укаранены ў навучальны працэс.

Рэкамендацыі па выкарыстанню. Атрыманыя вынікі могуць знайсці шырокае прымяненне ў навуцы і тэхніцы для распрацоўкі цвёрдацельных лазераў з дыёдны накачкі і састаўным рэзанатарам.

Вобласць прымянення. Навукаёмкі галіны стварэння цвёрдацельных лазерных сістэм.

SUMMARY

Krylova Liubou Georgievna

«Spatial-dynamic models of the formation of amplified radiation
in solid-state diode-pumped lasers»

Key words: laser radiation, solid-state laser, parameters optimization, distributed laser model.

The purpose of research: generalization of modern models of solid-state lasers to take into account the spatial inhomogeneity of the pump and radiation fields and to elucidate the parameters of laser systems that significantly affect their operating modes, power and dynamic characteristics.

Methods of investigations and used equipment: numerical simulation of dynamic characteristics using a distributed model. Used equipment: personal computers, SKIF supercomputer.

Obtained results and their novelty. It has been established that for a compact ytterbium-erbium laser with longitudinal diode pumping operating in the cw generation mode, it is possible to optimize the generation efficiency using both the length of an active medium and concentration of ions of the active medium NYb and NEr as variable parameters, and the ion concentration erbium can be significantly reduced as well. It is shown that for a compact longitudinal diode-pumped neodymium ion laser operating in the Q-switched mode, the initial transmission coefficient T of the saturable filter is not a universal characteristic, since, at the same T , the use of thinner filters with a higher concentration of chromium ions is more beneficial. Moreover, by choosing the reflection coefficient of the output mirror in the range of 0.6 – 0.8, it is possible to obtain the maximum peak output power with the same pulse duration. All results were obtained for the first time and are new to laser physics. A number of data obtained in the thesis are introduced into the educational process.

Recommendations for use. The results can be widely used in science and technology for the development and investigations of solid-state lasers with diode pumping and a composite resonator.

Application area. High-tech branches of creation of solid-state laser systems.

