

На правах рукописи

Захаров Никита Геннадьевич

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДВУХМИКРОННОГО
ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ Tm:YLF И Ho:YAG
С ДИОДНО-ЛАЗЕРНОЙ НАКАЧКОЙ**

01.04.21 – лазерная физика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
доцент А.П. Савикин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Ю.М. Сорокин
кандидат физико-математических наук
М.А. Новиков

Ведущая организация: Институт лазерно-физических
исследований (ИЛФИ)
РФЯЦ-ВНИИЭФ

Защита состоится « 09 » июня 2010 г. в 15-00 на
заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу:
Нижегород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420 .

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан « 07 » мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы

Одним из актуальных направлений лазерной физики в настоящее время является исследование лазерных систем, работающих в двухмикронном диапазоне длин волн (1,9-2,1 мкм). Большой интерес к данному диапазону обусловлен целым рядом обстоятельств. Прежде всего, двухмикронное излучение хорошо согласовано с одним из пиков поглощения воды и находится в безопасном для глаз диапазоне длин волн. Благодаря этому, лазеры, генерирующие в области 2 мкм, используются в различных областях медицины (урологии, гинекологии, ортопедии, отоларингологии, офтальмологии, стоматологии, общей хирургии) и лидарном зондировании атмосферы [1-3]. Кроме того, излучение с длиной волны более 2 мкм может быть эффективно преобразовано в средний ИК диапазон (3-8 мкм) с помощью нелинейно-оптических кристаллов $ZnGeP_2$, обладающих высокой квадратичной нелинейной восприимчивостью и теплопроводностью [4].

Несмотря на многочисленные приложения, двухмикронный диапазон длин волн является ещё недостаточно хорошо освоенным в лазерной физике. Лазерная генерация в этом диапазоне может быть реализована на кристаллах и стёклах, активированных ионами Tm^{3+} и Ho^{3+} . Однако твердотельные лазеры на основе тулиевых и гольмиевых материалов до последнего времени оставались изученными гораздо хуже, чем неодимовые или иттербиевые лазеры. В основном это связано со свойствами ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} , обладающих невысокими значениями сечения излучения и квазитрёхуровневой структурой уровней неудобной для накачки с помощью газоразрядных ламп.

Одними из наиболее распространенных лазерных систем двухмикронного диапазона являются системы на кристаллах $Ho:YAG$. Высокие оптические и термомеханические свойства матрицы YAG позволяют получать непрерывную и импульсно-периодическую генерацию большой мощности на длине волны 2,1 мкм. Лазеры на основе гольмий содержащих кристаллов с ламповой накачкой, генерирующие в диапазоне 2,1 мкм, исследовались в предыдущие годы [5]. При этом наилучшие результаты достигались при использовании лазерных кристаллов на основе матрицы YAG , которые наряду с ионами Ho^{3+} легировались ионами Tm^{3+} и Cr^{3+} . Низкая эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации на длине волны 2,1 мкм (менее 0,3 %) и, вследствие этого, большие габариты и высокое энергопотребление $Cr, Tm, Ho:YAG$ лазеров с ламповой накачкой, затрудняют их применение. С появлением доступных коммерческих диодных лазеров на смену системам с ламповой накачкой пришли лазеры с диодно-лазерной накачкой, что позволило увеличить мощность и эффективность генерации, улучшить качество пучка выходного излучения, а также уменьшить габариты лазерных систем и эксплуатационные расходы. Однако, кристалл $Ho:YAG$ не имеет интенсивных линий поглощения в диапазоне 780-980 нм, что не позво-

ляет использовать для его накачки доступные и мощные коммерческие GaAlAs и InGaAs лазерные диоды. Оптимальная накачка кристаллов Ho:YAG может быть осуществлена с помощью лазерного излучения на длине волны ~ 1908 нм. Работы зарубежных групп показывают возможность получения генерации Ho:YAG лазера со средней мощностью несколько десятков Вт при эффективности преобразования излучения накачки до 65% [6,7].

Для получения генерации в области 1,9 мкм используются лазеры на основе активных сред, легированных ионами Tm^{3+} . Достоинства этих лазеров определяются свойствами ионов Tm^{3+} , имеющих сильную и широкую полосу поглощения вблизи 0.8 мкм, идеальную для накачки мощными лазерными диодами, а также обладающих кросс-релаксационными переходами, обеспечивающими появление двух ионов на верхнем лазерном уровне на каждый поглощённый квант накачки. Одним из наиболее перспективных тулий содержащих кристаллов является Tm:YLF благодаря естественному двулучепреломлению, обеспечивающему линейную поляризацию генерации, и отрицательному коэффициенту температурного изменения показателя преломления, способствующему уменьшению суммарной тепловой линзы активного элемента, компенсируемой положительной линзой на торцах и электронным эффектом. Максимум усиления σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера на длине волны 1908 нм хорошо согласован с линией поглощения кристалла Ho:YAG и наилучшим образом подходит для накачки последнего. π -поляризованное излучение Tm:YLF лазера на длине волны 1888 нм может быть использовано для эффективной накачки кристаллов $Cr^{2+}:ZnSe$, позволяющих получать перестраиваемую генерацию в области 2-3 мкм. Исследования лазеров на кристаллах Tm:YLF показывают возможность генерации мощного излучения (~ 20 Вт) в пучках хорошего качества при эффективности использования торцевой или боковой диодной накачки 25%-40% [6,8].

Не смотря на наличие публикаций, посвященных лазерам на основе кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG, возможности повышения эффективности генерации и управления спектром выходного излучения недостаточно изучены. Оптимизация параметров лазеров Tm:YLF и Ho:YAG может быть выполнена на основе лучшего понимания физических процессов, происходящих в лазерных кристаллах, изучении оптических характеристик активных сред и схем оптической накачки, расчёте лазерных резонаторов с учётом наводимых накачкой линз, что требует проведения специальных физических исследований.

Целью диссертационной работы являлось исследование генерационных свойств и характерных особенностей кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG и создание на их основе высокоэффективных лазеров с продольной диодно-лазерной накачкой, а также возможности управления спектром генерации этих лазеров с помощью внутрирезонаторного интерференционно поляризационного фильтра.

Задачи исследования.

Для достижения намеченной цели были поставлены следующие задачи:

- Определение спектрально-оптических и кинетических характеристик кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG.
- Исследование методов фокусировки излучения накачки в активные элементы, а также проведение расчётов параметров резонаторов (с учётом наводимой накачкой тепловых линз), позволяющих согласовать основную моду резонатора с областью усиления в кристаллах.
- Проведение численного моделирования для выявления оптимальных параметров лазеров на основе кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG.
- Реализация лазерной генерации на кристаллах Tm:YLF и Ho:YAG и проведение экспериментальной оптимизации с целью получения максимальной мощности и эффективности генерации при высоком качестве пучка. Сравнение численных и экспериментальных результатов.
- Исследование возможности управления спектром Tm:YLF и Ho:YAG лазеров с помощью интерференционно-поляризационного фильтра и изучение влияния частотной селекции на параметры выходного излучения.

Научная новизна

1. Для кристаллов Tm:YLF с концентрацией ионов активатора 3% и 3,5% ат. найдены вероятности кросс-релаксационных процессов, являющихся определяющими в формировании инверсии населённости.
2. В лазере на кристалле Tm:YLF цилиндрической формы с продольной аксиально-симметричной диодной накачкой реализована генерация π - и σ -поляризованного излучения с рекордной выходной мощностью и эффективностью генерации. Исследовано влияние температуры активного элемента на эффективность генерации.
3. На основе комплексных измерений спектрально-оптических свойств кристаллов Tm:YLF и Ho:YAG определены факторы, влияющие на длину волны генерации и диапазон её возможной перестройки.
4. Осуществлено управление спектром выходного излучения лазеров на кристаллах Tm:YLF и Ho:YAG с продольной диодно-лазерной с помощью внутрирезонаторного интерференционно-поляризационного фильтра.
5. Выявлено влияние частотной селекции с помощью интерференционно-поляризационного фильтра, на амплитудную и временную стабильность импульсов в режиме модуляции добротности Ho:YAG лазера.

Практическая значимость работы

Исследованные мощные, высокоэффективные, компактные и перестраиваемые по частоте Tm:YLF и Ho:YAG лазеры с диодно-лазерной накач-

кой, генерирующие в области длин 1,9-2,1 мкм, могут быть использованы в различных областях медицины, лидарном зондировании атмосферы, технологических и научных приложениях, а также в качестве систем накачки параметрических генераторов света среднего ИК.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. В лазере на кристалле Tm:YLF цилиндрической формы с продольной аксиально-симметричной диодной накачкой достигнута генерация π - и σ -поляризованного излучения с рекордной средней мощностью более 31 Вт при полной оптической эффективности преобразования излучения накачки ~45% и высоком качестве пучка ($M^2 \sim 2,5$).
2. Использование внутрирезонаторного интерференционно поляризационного фильтра позволяет перестраивать спектр генерируемого излучения Tm:YLF лазера в диапазоне 1865-1940 нм.
3. Частотная селекция с помощью интерференционно-поляризационного фильтра позволяет реализовать как непрерывный, так и импульсно-периодический режимы генерации Ho:YAG лазера на одной из трёх спектральных линий ~2090 нм, 2097 нм или 2123 нм с эффективностью более 45 %.
4. Использование внутрирезонаторного интерференционно-поляризационного фильтра позволяет значительно повысить амплитудную и временную стабильность импульсов в режиме модуляции добротности Ho:YAG лазера.

Методы исследования и достоверность результатов

При проведении численного моделирования использовались стандартные методы решения дифференциальных уравнений. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартных методик оптических измерений и статистической обработки полученных данных. Достоверность представляемых результатов подтверждается согласованностью теоретических, численных и экспериментальных результатов, а также согласованностью с независимо полученными результатами других исследователей.

Апробация результатов и публикации

Результаты диссертации опубликованы в 6 статьях в реферируемых российских (Квантовая электроника, Оптика и спектроскопия, Оптический журнал) и международном (Laser and Particle Beams) научных журналах, учебно-методическом пособии ННГУ им. Лобачевского, препринте ИПФ РАН и 11 сборниках докладов и тезисов международных и всероссийских конференций.

Материалы диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры квантовой радиофизики ННГУ и Института прикладной физики РАН, всероссийских и международных конференциях, в том числе:

International Conference High-power laser beams (HPLB-2006), N. Novgorod, Russia (2006); International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT) Minsk, Belarus (2007); 3th and 4th International Conference «Laser Optics for Young Scientists», St. Petersburg, Russia (2006 and 2008); Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2008), San Jose, USA (2008); «Laser Optics 2008», St. Petersburg, Russia (2008); 17th International conference «Laser physics workshops» (LPHYS'08), Trondheim, Norway (2008); 3rd EPS-QEOD Euro-photon Conference, Paris, France (2008); Международная научная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», С.-Петербург (2007 и 2009); Семнадцатая международная научная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геологии», Новороссийск (2009); Всероссийская конференция «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники: физические свойства и применение», Саранск (2009); 13-я и 14-я научные школы «Нелинейные волны», Нижний Новгород (2006 и 2008); 11-я и 13-я конференция по радиофизике, Нижний Новгород (2007 и 2009); 12-я Нижегородская сессия молодых учёных (естественные дисциплины), Нижний Новгород (2007).

Исследования, результаты которых приведены в диссертации, выполнены при поддержке грантов РФФИ 06-02-81046-Бел_а, 07-02-92184-НЦНИ_ф и 08-02-99050-офи, АВЦП 2.1.1/3603 и др.

Личный вклад автора

Основные результаты работы получены автором лично. Диссертант принимал непосредственное участие как в постановке задач, так и в расчетах, экспериментальных работах, обсуждении и физической интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 149 страниц, включая 61 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 85 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее цели, кратко излагается содержание диссертации, приводятся основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена исследованию спектрально-оптических и кинетических характеристик кристалла Tm:YLF и проведению численного моделирования Tm:YLF лазера с диодной накачкой.

В параграфе 1.1 рассматриваются свойства матрицы YLF. Описываются результаты экспериментальных исследований эффективных сечений поглощения и излучения в зависимости от длины волны. Определяются области с максимальным усилением и диапазон возможной перестройки генерации для π - и σ -поляризации в зависимости от инверсии населённости.

В параграфе 1.2 анализируются механизмы создания инверсии населённости в кристалле Tm:YLF. Из экспериментально измеренных зависимостей кинетики люминесценции с уровня 3H_4 для активных элементов с концентрацией ионов активатора 3% и 3,5% ат. находятся вероятности кросс-релаксационных процессов, являющихся определяющими в формировании инверсии населённости. Рассчитывается соответствующая квантовая эффективность накачки $\eta_{\text{кв}}$. Получено, что для кристалла Tm:YLF с легированием 3% ат. $\eta_{\text{кв}} \sim 1,78$, а для 3,5% ат. $\eta_{\text{кв}} \sim 1,82$.

В параграфе 1.3 приводятся результаты исследования параметров излучения диодных линеек с волоконным выходом, используемых для накачки кристаллов Tm:YLF. Находится теоретическое значение поглощаемой мощности накачки в активном элементе. Исследуются возможности формирования излучения диодных линеек с помощью различных линзовых систем. Описываются двухлинзовые системы, позволяющие оптимальным образом фокусировать пучок накачки в активный элемент. Приводятся экспериментальные зависимости доли поглощенной в кристалле мощности накачки от мощности излучения диодных линеек в схемах с настроенным и разъюстированным резонатором.

В параграфе 1.4 приводятся результаты исследования тепловой линзы, наводимой в активном элементе под действием интенсивной накачки. На основе полученных данных проводится расчёт параметров резонатора, позволяющий согласовать область усиления в кристалле с основной модой резонатора.

В параграфе 1.5 приводятся результаты численного моделирования Tm:YLF лазера с помощью решения совместной системы уравнений, описывающих кинетику населенностей ионов Tm^{3+} и плотности потока фотонов в резонаторе. Определяются временные зависимости населенностей уровней 3H_6 , 3F_4 и 3H_4 в схеме с настроенным и разъюстированным резонатором. Находятся параметры лазерной системы, позволяющие получать максимальную эффективность генерации для π - и σ -поляризованного излучения. Приводятся зависимости выходной мощности от мощности накачки для генерации на π - и σ -поляризации, полученные в результате численного моделирования. Показывается, что при параметрах Tm:YLF лазера, реализуемых в эксперименте, эффективность генерации достигает 48%.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований лазера на основе кристалла Tm:YLF цилиндрической формы с продольной аксиально-симметричной диодной накачкой.

В параграфе 2.1 описывается схема экспериментальной установки. Рассматриваются различные архитектуры резонатора, отличающиеся методами ввода излучения накачки внутрь резонатора.

В параграфе 2.2 приводятся результаты экспериментальных исследований Tm:YLF лазера, генерирующего σ -поляризованное излучение. Показано, что оптимизация параметров лазера, таких как длина кристалла и процент легирования ионами Tm^{3+} , коэффициент отражения и радиус кривизны выходного зеркала, фокусировка излучения накачки в активный элемент позволяет получить эффективность генерации σ -поляризованного излучения $\sim 45\%$ при выходной мощности более 31 Вт (рис. 2). Описывается влияние температуры активного элемента на выходную мощность. Сравняются эффективности генерации для различных схем резонатора.

Установлено, что центр спектра генерации σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера находится на длине волны 1909 нм и хорошо согласуется с одним из максимумов поглощения в кристалле Ho:YAG (рис. 1). Провал в спектре выходного излучения Tm:YLF лазера на длине волны ~ 1909 нм обусловлен интенсивной линией поглощения паров воды.

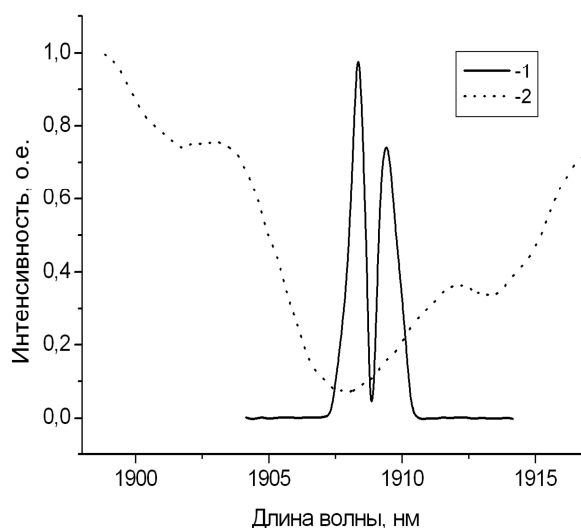


Рис.1. Спектры генерации σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера (кривая 1), и пропускания кристалла Ho:YAG (кривая 2).

В параграфе 2.3 демонстрируются результаты экспериментальных исследований Tm:YLF лазера, генерирующего π -поляризованное излучение. Показано, что эффективность генерации достигает 46% при выходной мощности ~ 32 Вт. Установлено, что в зависимости от добротности резонатора генерация реализуется на длине волны 1878 нм или 1888 нм.

В параграфе 2.4 проводится сравнение численных и экспериментальных зависимостей выходной мощности от мощности накачки для Tm:YLF лазера, генерирующего на π и σ -поляризации (рис. 2). Получено хорошее согласование численных и экспериментальных результатов.

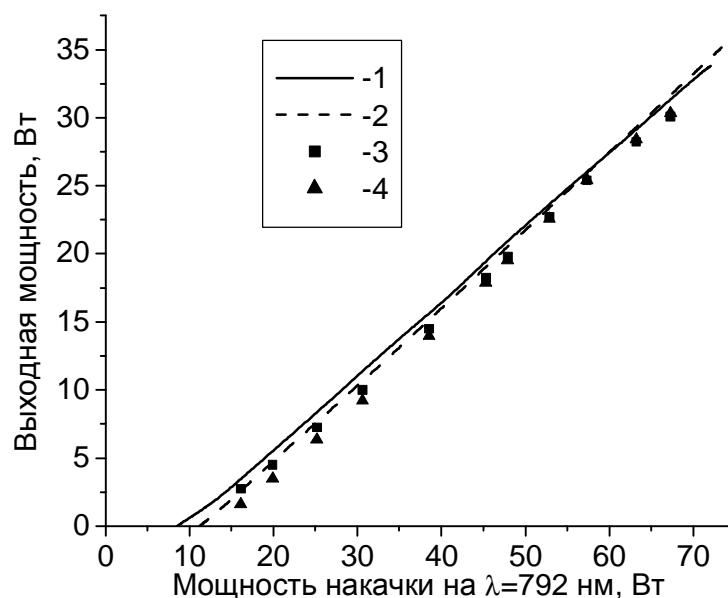


Рис. 2. Зависимость выходной мощности Tm:YLF лазера от мощности накачки для σ - (кривая 1 – численное моделирование, кривая 3 - эксперимент) и π -поляризованного (кривая 2 – численное моделирование, кривая 4 - эксперимент) излучения.

В параграфе 2.5 описываются исследования пространственного распределения пучка генерации Tm:YLF лазера, проведённые с помощью ИК камеры (Pugosat III). Согласно стандартной методике Международной организации по стандартизации определялся параметр качества M^2 . Показано, что при мощности генерации ~ 30 Вт в схеме с выходным зеркалом $r=200$ мм и $R=80\%$ для π - и σ -поляризованного излучения параметр $M^2 \sim 2,5$.

В параграфе 2.6 приводятся результаты по реализации перестраиваемой генерации с помощью интерференционно-поляризационного фильтра (ИПФ), помещённого внутрь резонатора Tm:YLF лазера (рис. 3). Перестройка спектра генерации для σ -поляризации осуществлялась в пределах полосы от 1885 нм до 1940 нм. Для π -поляризованного излучения перестройка выходного излучения реализовывалась в области 1865-1900 нм. Общий диапазон перестройки для обеих поляризаций составил величину ~ 75 нм и находился в пределах от 1865 нм до 1940 нм.

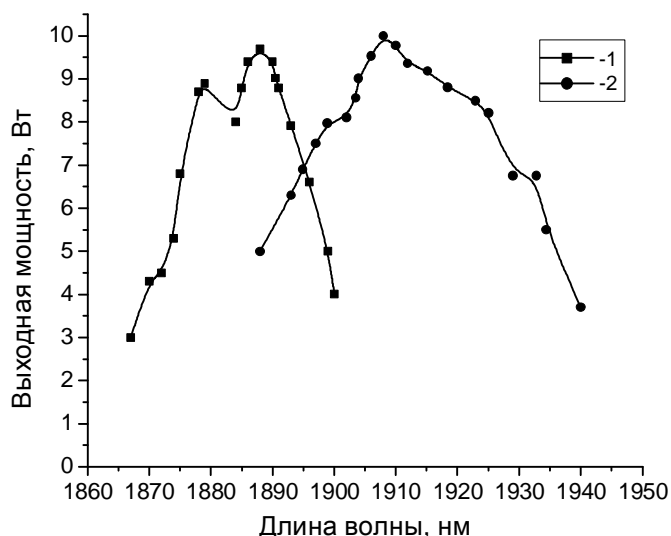


Рис. 3. Перестроечная кривая для генерации π - и σ -поляризованного излучения, (кривые 1 и 2, соответственно) при мощности накачки ~ 30 Вт.

Третья глава посвящена исследованию спектрально-оптических характеристик кристалла Ho:YAG и проведению численного моделирования Ho:YAG лазера с продольной накачкой излучением Tm:YLF лазера.

В параграфе 3.1 описываются свойства матрицы YAG . Приводятся результаты экспериментальных измерений эффективных сечений поглощения и излучения в зависимости от длины волны. Определяются области с максимальным усилением в зависимости от инверсии населённости.

В параграфе 3.2 анализируется кинетика энергетических состояний ионов Ho^{3+} . Рассматриваются процессы, приводящие к потерям инверсии в кристалле Ho:YAG .

В параграфе 3.3 демонстрируются результаты исследований фокусировки излучения накачки с помощью различных линзовых систем. Описываются двухлинзовые системы, позволяющие формировать в свободном пространстве области пучка генерации Tm:YLF лазера диаметром в перетяжке от 530 до 800 мкм. Приводится экспериментальная зависимость доли поглощенной в кристалле мощности накачки в схемах с настроенным и разъюстированным резонатором.

В параграфе 3.4 описываются результаты расчёта параметров резонатора (с учётом тепловой линзы, наводимой накачкой в активном элементе), позволяющего согласовать область усиления в кристалле с основной модой резонатора.

В параграфе 3.5 приводятся результаты численного моделирования Ho:YAG лазера с помощью решения совместной системы уравнений, описывающих кинетику населенностей ионов Ho^{3+} и плотности потока фотонов в резонаторе. Находятся параметры лазерной системы позволяющие получать максимальную эффективность генерации. Приводятся зависимости выходной мощности от мощности накачки для схем с одним и двумя прохождениями излу-

чения накачки через активный элемент, полученные в результате численного моделирования. Установлено, что при параметрах Ho:YAG лазера, реализуемых в эксперименте, эффективность генерации достигает 63%. В зависимости от значений коэффициента отражения выходного зеркала и длины активного элемента, генерация происходит на длинах волн ~2090 нм, ~2097 нм или ~2123 нм.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований Ho:YAG лазера с продольной накачкой излучением Tm:YLF лазера.

В параграфе 4.1 описывается схема экспериментальной установки. Рассматриваются различные архитектуры резонатора с одним и двумя проходами излучения накачки через активный элемент.

В параграфе 4.2 приводятся результаты экспериментальных исследований Ho:YAG лазера, генерирующего в непрерывном режиме. Показано, что оптимизация параметров лазера, таких как длина кристалла, коэффициент отражения и радиус кривизны выходного зеркала, фокусировка излучения накачки в активный элемент позволяет получить эффективность генерации ~56% при выходной мощности более 15 Вт (рис. 4). Описывается влияние температуры активного элемента на выходную мощность. Сравняются эффективности генерации для различных схем резонатора. Проводится сопоставление экспериментальных результатов с результатами численных расчётов. Установлено хорошее согласование экспериментальных и модельных зависимостей.

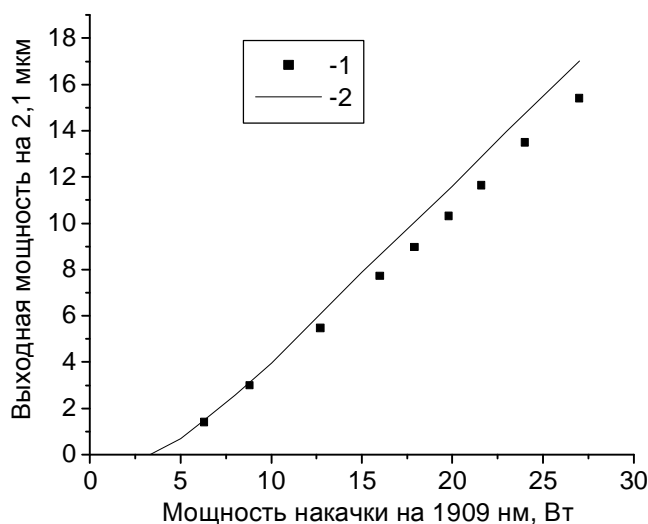


Рис.4. Зависимость выходной мощности от мощности накачки, полученные экспериментально (зависимость 1) и с помощью численного моделирования (кривая 2).

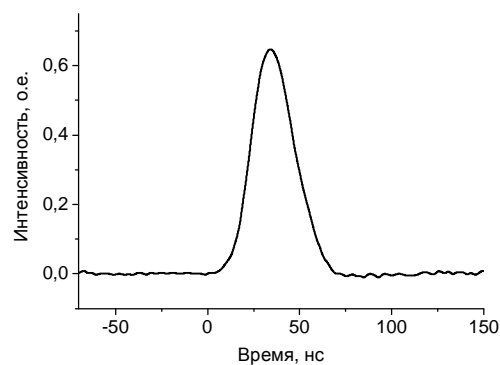


Рис.5. Осциллограмма импульса генерации Ho:YAG лазера в режиме модуляции добротности при выходной мощности 11 Вт и частоте повторения 3 кГц.

В параграфе 4.3 описываются результаты экспериментальных исследований Ho:YAG лазера, работающего в режиме модуляции добротности, реализованном с помощью акустооптического затвора. Показана возможность генерации высокостабильной периодической последовательности импульсов с частотой повторения 2,5-20 кГц, длительностью импульсов 25-170 нс и средней по времени мощностью до 14,7 Вт (рис. 5). Приводятся зависимости длительности гигантских импульсов от мощности накачки и частоты модуляции.

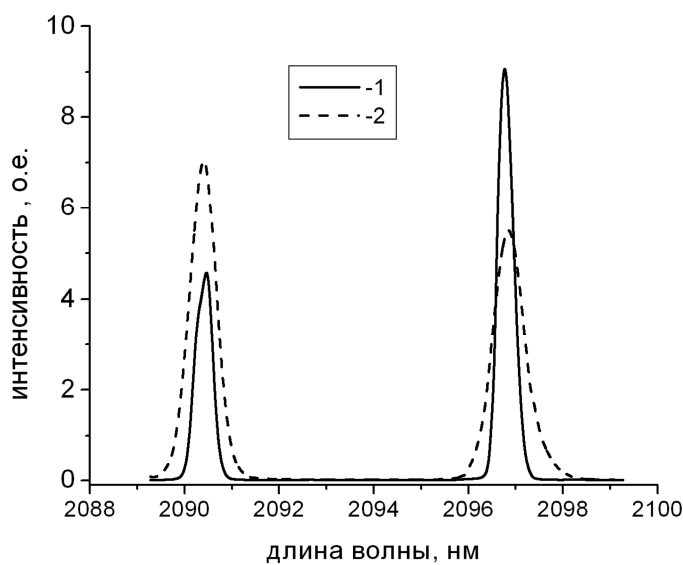


Рис.6. Спектр генерации Ho:YAG лазера. Непрерывный режим (кривая 1); режим модуляции добротности (кривая 2)

В параграфе 4.4 описываются результаты исследований спектрального состава выходного излучения Ho:YAG лазера, работающего как в непрерывном режиме, так и в режиме модуляции добротности. Установлено, что при используемых в эксперименте параметрах лазера, в зависимости от добротности резонатора и длины активного элемента генерация реализуется сразу на двух спектральных линиях с центрами на ~2090 нм и ~2097 нм или ~2097 нм и ~2123 нм (рис. 6). Рассматривается возможность управления спектром выходного излучения с помощью ИПФ. Показано, что использование ИПФ позволяет реализовать лазерную генерацию, как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режиме на одной из трёх спектральных линий с длинами волн: ~2090 нм, 2097 нм или 2123 нм и эффективностью более 45%. Обсуждается влияние ИПФ на амплитудную и временную стабильность импульсов генерации Ho:YAG лазера в режиме модуляции добротности.

В параграфе 4.5 описываются результаты исследования качества пучка генерации Ho:YAG лазера. Показано, что при мощности генерации ~14 Вт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах параметр $M^2 < 1,3$.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведено численное моделирование Tm:YLF лазера с продольной диодной накачкой. Для проведения расчётов были измерены оптические характеристики кристалла Tm:YLF и найдены вероятности кросс-релаксационных процессов, являющихся определяющими в формировании инверсии населённости. Рассчитаны параметры резонатора с учётом тепловой линзы, наводимой в активном элементе, позволяющие согласовать область усиления в кристалле с основной модой резонатора.
2. В лазере на кристалле Tm:YLF цилиндрической формы с аксиально-симметричной продольной диодной накачкой реализована генерация π - и σ -поляризованного излучения с рекордной средней мощностью более 31 Вт при эффективности преобразования излучения накачки ~45 % и качестве пучка $M^2 \sim 2,5$ на длине волны 1888 нм и 1909 нм, соответственно. С помощью внутрирезонаторного ИПФ реализована перестраиваемая генерация в области 1865-1940 нм.
3. На основе численного моделирования проведена оптимизация параметров Ho:YAG лазера с накачкой излучением Tm:YLF лазера. Показано, что при изменении добротности резонатора и длины активного элемента доминирует одна из трёх наиболее интенсивных спектральных линий 2090 нм, 2097 нм и 2123 нм.
4. В лазере на кристалле Ho:YAG с накачкой излучением Tm:YLF лазера на длине волны ~1909 нм реализована непрерывная генерация пучка высокого качества ($M^2 \leq 1,3$) со средней мощностью ~15,4 Вт при полной оптической эффективности преобразования накачки ~56%. В режиме активной модуляции добротности с использованием акустооптического затвора получена генерация высокостабильной периодической последовательности импульсов с частотой повторения от 2,5-20 кГц, длительностью 25-170 нс и средней по времени мощностью ~14,7 Вт.
5. С помощью внутрирезонаторного ИПФ проведена частотная селекция, позволяющая получать генерацию Ho:YAG лазера как в непрерывном, так и импульсно-периодическом режимах на одной из трёх спектральных линий ~2090 нм, 2097 нм или 2123 нм с эффективностью более 45% и шириной линии менее 0.5 нм. Показано, что использование ИПФ позволяет значительно повысить амплитудную и временную стабильность импульсов в режиме модуляции добротности.

Список цитируемой литературы

[1] С.В. Грачев. Гольмиевый лазер в медицине // Москва, Издательство: Триада-Х, ISBN: 5-8249-0102-3(I), 240 с. (2003).

[2] T.M. Buzug, D.J. Bongartz, M.U. Hartmann and S. Weber. Design and Technical Concept of a Tm Laser Scalpel for Clinical Investigation Based on a 60W, 1.92 μm Tm Fiber Laser System // Advances in Medical Engineering, **114**, pp. 447-452 (2007).

[3] S.W. Henderson, C.P. Hale, J.R. Magee, M.J. Kavaya, and A.V. Huffaker. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 using Tm:Ho:YAG lasers // *Opt. Lett.* **16**(10), pp. 773-775 (1991).

[4] S. Das, G.C. Bhar, S. Gangopadhyay, and C. Ghosh. Linear and Nonlinear Optical Properties of ZnGeP₂ Crystal for Infrared Laser Device Applications: Revisited. // *Appl. Opt.* **42**, pp. 4335-4340 (2003).

[5] M.G. Jani, N.P. Barnes, and K.E. Murray. Flash-lamp-pumped Ho:Tm:Cr:YAG and Ho:Tm:Er:YLF lasers: experimental results of a single, long pulse length comparison. *Appl. Opt.* **36**, pp. 3357-3362 (1997).

[6]. P.A. Budni, L.A. Pomeranz, M.L. Lemons, C.A. Miller, J.R. Mosto, and E.P. Chicklis. Efficient mid-infrared laser using 1.9- μ m-pumped Ho:YAG and ZnGeP₂ optical parametric oscillators // *J. Opt. Soc. Am. B.* **17**(5), pp. 723 – 728 (2000).

[7] E. Lippert, S. Nicolas, G. Arisholm, K. Stenersen, and G. Rustad. Midinfrared laser source with high power and beam quality // *Appl. Opt.* **45**, pp. 3839-3845 (2006).

[8] X.M. Duan, B.Q. Yao, Y.J. Zhang, C.W. Song, L.L. Zheng, Y.L. Ju, and Y.Z. Wang. Diode-pumped high efficient Tm:YLF laser output at 1908 nm with near-diffraction limited beam quality // *Laser Phys. Lett.* **5**(5), pp. 347–349 (2008).

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, В.В. Шарков, О.Н. Еремейкин, Ю.Н. Фролов, Г.М. Мищенко, С.Д. Великанов. Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле Tm:YLF с диодной накачкой // *Квант. электроника*, **39**(5), 410–414 (2009).
2. О.Н. Еремейкин, Н.А. Егоров, Н.Г. Захаров, А.П. Савикин, В.В. Шарков. Исследование тепловой линзы в кристалле Tm:YLF при интенсивной диодной накачке // *Оптический журнал*, **76**(11) стр. 5-9 (2009).
3. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, В.В. Шарков, А.П. Савикин. Эффективная генерация на длине волны 2,1 мкм в лазере на кристалле Ho:YAG с накачкой излучением Tm:YLF лазера // *Квант. электроника*, **40**(2), с. 98–100 (2010).
4. Ф.А. Большиков, Е.В. Жариков, Н.Г. Захаров, Д.А. Лис, П.А. Рябочкина, К.А. Субботин, О.Л. Антипов. Генерация двухмикронного лазерного излучения в кристаллах NaLa_{1/2}Gd_{1/2}(WO₄)₂, активированных ионами Tm³⁺ // *Квант. электроника*, **40**(2), с. 101–102 (2010).
5. И.А. Гришин, Н.Г. Захаров, Н.В. Козлова, А.П. Савикин. Исследование оптических характеристик стекла TZLB, легированного ионами Er³⁺ и Yb³⁺ // *Оптика и спектроскопия*, **107**(5), с. 768-771 (2009).
6. O.L. Antipov, M.S. Kuznetsov, N.G. Zakharov. Laser oscillators with nonlinear dynamic cavity formed by resonant refractive-index gratings // *Laser and Particle Beams, Invited Review Article: Trends in Stimulated Brillouin Scattering and Optical Phase Conjugation*, Ed. By M. Ostermeyer, pp. 54-60 (2008).

7. А.А. Андронов, Н.Г. Захаров, А.В. Маругин, А.П. Савикин. Новые источники и приёмники ИК и терагерцового диапазона // Учебно-методическое пособие ННГУ им. Лобачевского, 95 с. (2007).
8. О.Л. Антипов, Н.Г. Захаров, М.С. Кузнецов, А.Д. Юнаковский. Численное моделирование условий генерации в лазерах с петлевым резонатором на динамических решётках // Препринт ИПФ РАН №761, Нижний Новгород, Изд-во Института прикладной физики РАН, 28 с. (2008).
9. N.G. Zakharov, O.L. Antipov, O.N. Eremykin, A.P. Savikin. Optimization of a diode-pumped Tm:YLF laser at 1908 nm // High-power Laser Beams 2006, N. Novgorod, Russia. Technical Digest, p. 117 (2006).
10. О.Н. Еремейкин, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, Н.Г. Захаров, Ю.Н. Фролов, Г.М. Мищенко. Высокоэффективный лазер на кристалле Ho:YAG как задающий генератор для систем среднего ИК-диапазона // XIII научная школа «Нелинейные волны-2006», Н.Новгород. Тезисы докладов, с. 48 (2006).
11. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, О.Н. Еремейкин. Эффективный и компактный Tm:YLF лазер с диодной накачкой, генерирующий на длине волны 1908 нм // 12-я Нижегородская сессия молодых учёных (естественные дисциплины), Н.Новгород. Тезисы докладов, с. 52 (2007).
12. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, О.Н. Еремейкин, Шарков В.В. Высокоэффективный диодно-накачиваемый Tm:YLF-лазер на длине волны 1908 нм // Международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», С.-Петербург. Тезисы докладов, с. 29 (2007).
13. О.Н. Еремейкин, Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, В.В. Шарков. Ho:YAG-лазер на длине волны 2,1 мкм с лазерной накачкой на 1908 нм // Международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация», С.-Петербург. Тезисы докладов, с. 31 (2007).
14. О.Л. Антипов, Н.Г. Захаров, О.Н. Еремейкин, А.П. Савикин. Эффективный и компактный Tm:YLF лазер с диодной накачкой, генерирующий на длине волны 1908 нм. // Одиннадцатая научная конференция по радиофизике, посвященная 105-й годовщине со дня рождения М.Т. Греховой, г. Н. Новгород, Тезисы докладов, с. 35 (2007).
15. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, О.Н. Еремейкин, А.П. Савикин. Исследование динамики генерации Tm:YLF-лазера с диодной накачкой. // 14 научная школа «Нелинейные волны-2008», Нижний Новгород. Тезисы докладов, с. 60-61 (2008).
16. N.G. Zakharov, O.L. Antipov, O.N. Eremykin, A.P. Savikin. Generation characteristics of a longitudinally diode-pumped Tm:YLF laser. // «4th Laser Optics for Young Scientists», St. Petersburg, Russia. Technical Digest, p. 84 (2008).
17. С.В. Егоров, Н.Г. Захаров, А.П. Савикин. Оптимизация выходного зеркала твердотельного TmYLF лазера с диодной накачкой // Тринадцатая научная конференция по радиофизике, посвященная 85-летию со дня рождения М.А.Миллера, г. Н. Новгород. Тезисы докладов с. 29-31 (2009).

18. А.А. Андронов, О.Н. Еремейкин, С. Ю. Железнов, А.П. Савикин, К.Ю. Павленко, В.В. Шарков, Н.Г. Захаров. Тм:YLF лазер с диодной накачкой для задач спектроскопии газов в среднем ИК диапазоне // 17-я международная научная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии и геологии», г. Новороссийск. Тезисы докладов с. 11-12 (2009).
19. А.А. Андронов, О.Н. Еремейкин, С.Ю.Железнов, А.П. Савикин, Павленко К.Ю., В.В. Шарков, Н.Г. Захаров. Тм:YLF лазер с диодной накачкой для задач спектроскопии газов в среднем ИК диапазоне // 19-я международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация. 2009». Сборник докладов, том 4. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, с. 200 (2009).
20. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, В.В. Шарков, А.П. Савикин. Эффективные и компактные твердотельные лазеры двухмикронного диапазона // 8-я Всероссийская конференция «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники: физические свойства и применение», Саранск. Тезисы докладов, с. 99-100 (2009).
21. Н.Г. Захаров, О.Л. Антипов, А.П. Савикин, В.В. Шарков, О.Н. Еремейкин, Ю.Н. Фролов, Г.М. Мищенко, С.Д. Великанов. Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле Тм:YLF с диодной накачкой // «Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ», **16** (2010) в печати.