

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 681.7.069.24

ИВАШКО
Алексей Михайлович

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ УЬ:УАG МИКРОЧИП ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМ
ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ
ОБЪЕКТАМИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.07 –
Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Минск, 2017

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете и в ОАО «Пеленг».

Научный руководитель: **Кисель Виктор Эдвардович**,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий НИЦ «Оптических материалов
и технологий» филиала БНТУ «Научно-
исследовательская часть»

Официальные оппоненты: **Матюшков Владимир Егорович**,
доктор технических наук, профессор,
первый заместитель директора – главный ин-
женер ОАО «КБТЭМ-ОМО»

Холенков Андрей Вадимович,
кандидат технических наук, инженер 2-ой
категории ЗАО «Солар-ЛС»

Опонирующая организация: Белорусский государственный университет

Защита состоится «02» февраля 2018 г. в 14¹⁵ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.17 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, пр. Независимости 65, ауд. 202. Телефон ученого секретаря (017) 293-96-18, e-mail: D.02.05.17@tut.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук

Н.Н. Ризноокая

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное управление движущимися объектами в режиме реального времени применяется во многих технических сферах. Передача сигнала от системы управления к управляемому объекту осуществляется большим количеством способов, основанных на различных физических принципах. Применение излучения оптического диапазона для передачи сигнала движущемуся объекту в общей массе встречается достаточно редко, однако в некоторых сферах, в частности в приборах специального назначения, такой способ обладает рядом преимуществ, таких как низкая вероятность перехвата управления и постановки электромагнитных помех и др.

В системах дистанционного управления (СДУ) подобного рода могут использоваться различные источники света, но наиболее подходящими и чаще всего применяемыми являются лазеры. В зависимости от типа управляемого объекта в существующих системах применяются лазеры, работающие как в непрерывном, так и в импульсном режиме генерации. В данной работе под СДУ понимаются оптико-электронные приборы, для которых необходим лазер в непрерывном режиме генерации в спектральной области от 1,03 до 1,07 мкм (далее – около 1 мкм).

К СДУ предъявляются жесткие требования по устойчивости к внешним воздействующим факторам, таким как механические нагрузки и широкий диапазон температур окружающей среды. Разработка и изготовление лазеров, работающих в режиме непрерывной генерации с выходной мощностью в несколько ватт в спектральной области около 1 мкм, является тривиальной задачей при работе в лабораторных условиях. Однако при значительном колебании температур и воздействии ударных и вибрационных нагрузок возникает ряд проблем с работоспособностью системы и со стабильностью ее характеристик. Радикальным способом решения проблемы работоспособности в широком диапазоне температур является принудительная температурная стабилизация всего лазера, либо отдельных наиболее ответственных компонентов, таких как активная среда и источник накачки. Соответственно, возрастает сложность системы, ее энергопотребление, а также габаритные размеры, масса и время выхода на рабочий режим, что в некоторых случаях недопустимо.

На момент начала работы над диссертацией в СДУ использовались лазеры, как с ламповой накачкой, так и с диодной. Лазер с ламповой накачкой характеризуется повышенным энергопотреблением и наличием системы жидкостного охлаждения, а волоконные лазеры с диодной накачкой хоть и лишены этих недостатков, но в их состав входят дорогостоящие импортные комплектующие и узлы. Поэтому актуальна разработка лазера с необходимыми техническими характеристиками для СДУ, который будет лишен принципиальных недостатков уже существующих лазеров.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует:

– приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 г. №585: «6.4. Новые типы лазеров в широком спектральном, временном и мощностном диапазонах, в том числе твердотельные и волоконно-оптические лазеры, лазеры на свободных электронах» и «6.5. Физические основы и разработка лазерных, оптико-электронных технологий и приборов, в том числе приборов ночного видения»;

– приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. №190: «6. Электроника и фотоника».

Диссертационная работа выполнялась в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ ОАО «Пеленг».

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и создание лазеров непрерывного режима генерации для существующих и перспективных СДУ, работающих в спектральной области около 1 мкм в широком температурном диапазоне и при воздействии механических нагрузок, обладающих эксплуатационными, конструктивными, технологическими и экономическими преимуществами по сравнению с существующими аналогами, такими как твердотельный неодимовый лазер с ламповой накачкой и волоконный лазер на основе иттербиевого волокна.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

– установить недостатки существующих лазеров из состава СДУ и определить базовые требования к разрабатываемым лазерам для повышения эксплуатационных характеристик СДУ;

– изучить возможность использования различных твердотельных материалов в качестве активной среды, а также исследовать варианты источников полупроводниковой накачки для лазеров, работающих в температурном диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;

– определить условия генерации и экспериментально реализовать непрерывный режим работы лазера с продольной диодной накачкой в широком температурном диапазоне без применения активной температурной стабилизации системы;

– разработать различные варианты построения лазеров с целью увеличения выходной мощности для СДУ с повышенными требованиями к энергетическим параметрам лазерного излучения, а также эксперимен-

тально исследовать особенности получения лазерной генерации для предложенных вариантов.

Объектом исследования являлись лазеры с продольной диодной накачкой для СДУ на основе материалов, легированных ионами Yb^{3+} .

Предметом исследования являлись энергетические, пространственные и спектральные характеристики твердотельного микрочип лазера с продольной диодной накачкой, а также методы повышения выходной мощности генерируемого излучения.

Научная новизна

– Впервые показано, что использование микрочип конфигурации резонатора на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ с продольной диодной накачкой одиночными лазерными диодами в герметичном корпусе с волоконным выводом излучения позволяет реализовать лазер в непрерывном режиме генерации для работы при воздействии механических нагрузок в диапазоне температур окружающей среды от $-50\text{ }^\circ\text{C}$ до $+65\text{ }^\circ\text{C}$ без применения систем температурной стабилизации, принудительного охлаждения и нагрева составных частей лазерной системы.

– На основе анализа зависимости выходной мощности $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера с диодной накачкой от температуры окружающей среды в диапазоне от $-50\text{ }^\circ\text{C}$ до $+65\text{ }^\circ\text{C}$ показано, что параметры активного чипа, такие как концентрация активных центров, толщина элемента и коэффициент пропускания выходного зеркала должны выбираться по характеристикам генерируемого излучения при накачке в минимумах полос поглощения ионов Yb^{3+} в спектральной области около 922 нм и 950 нм.

– Впервые предложена и экспериментально исследована схема одновременной продольной диодной накачки нескольких пространственно разнесенных зон одного элемента на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ в микрочип конфигурации резонатора, что позволило в несколько раз увеличить выходную мощность генерируемого излучения в широком диапазоне температур окружающей среды.

– Экспериментально показано, что одновременная прокачка соседних зон активного элемента на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ позволяет получать Гауссов пространственный профиль распределения интенсивности каждого отдельного лазерного пучка при выходной мощности излучения на 30 % выше, чем в отсутствие прокачки соседних областей.

Практическая значимость полученных результатов

Результаты диссертационного исследования применены в ОАО «Пеленг» при разработке лазеров как для уже существующих СДУ (замена существовавших аналогов), так и для вновь разработанных систем нового конструктивного исполнения с усовершенствованными массогабаритными и энергетическими характеристиками, в которых невозможно применить

предшествующие аналоги лазера. Себестоимость изготовления разработанных лазеров (при сравнимых характеристиках генерируемого излучения) ниже существовавших аналогов.

Разработано 9 вариантов исполнения лазеров, в том числе по конструкции и выходной мощности. Изготовлено более 150 шт. лазеров различных модификаций.

Разработкой и изготовление лазеров стимулировали освоение новых для ОАО «Пеленг» технологий и новых подходов в разработке контрольно-юстировочных и измерительных приборов, которые успешно применяются при изготовлении других оптико-электронных систем.

Положения, выносимые на защиту

1. Теоретически обоснованный и экспериментально подтвержденный способ выбора параметров элементной базы $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера, работающего в непрерывном режиме генерации без применения системы температурной стабилизации, основанный на выборе характеристик активного элемента по максимальной выходной мощности генерируемого излучения при накачке в минимумах полос поглощения ионов Yb^{3+} , позволяет впервые создать $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазер, не требующий системы температурной стабилизации и работающий в температурном диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (мощность излучения более 2 Вт при мощности накачки 6 Вт).

2. Метод повышения выходной мощности $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера, работающего в непрерывном режиме генерации, основанный на суммировании выходного излучения от нескольких пространственно неперекрывающихся прокачиваемых областей в одном активном элементе, обеспечивает генерацию нескольких лазерных пучков с взаимно параллельными осями и суммарной мощностью излучения кратной количеству прокачиваемых областей.

3. Экспериментально обнаруженный эффект взаимного влияния количества пространственно неперекрывающихся прокачиваемых областей в одном активном элементе и расстояния между ними в $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазере на выходную мощность и пространственные характеристики излучения позволяет получить Гауссов пространственный профиль распределения интенсивности каждого отдельного лазерного пучка при выходной мощности на 30 % выше, чем в отсутствие прокачки соседних областей.

Личный вклад соискателя ученой степени

Соискателю ученой степени принадлежит анализ лазеров для СДУ, определение базового подхода к разработке лазера, выбор активной среды и источника накачки, разработка экспериментальных установок, проведение экспериментов, разработка схем построения микрочип лазеров и расчет оптических схем накачки, анализ и интерпретация полученных результатов численного моделирования и экспериментальных данных, формулировка основных

выводов и положений, выносимых на защиту. Научному руководителю работы В.Э. Киселю принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задач и обсуждении методов и результатов исследований. Соавтор совместных публикаций А.С. Ясюкевич (НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ) оказывал консультативную помощь при разработке математической модели работы микрочип лазера. Н.В. Кулешов (НИЦ Оптических материалов и технологий БНТУ) оказывал консультативную помощь при подготовке диссертации и написании статей. С.Б. Литвяков, В.В. Батюшков, А.М. Тареев, А.И. Немененок (ОАО «Пеленг») участвовали в постановке задач и оказывали всестороннее содействие для проведения экспериментальных исследований. И.В. Васильева (ОАО «Пеленг») оказывала консультативную помощь при расчете оптических систем накачки. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, которые не вошли в диссертацию.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Европейская конференция по твердотельным и волоконным источникам когерентного излучения (Europhoton) (Стокгольм, Швеция 2012), международные научно-технические конференции «Приборостроение» (Минск 2013, 2014, 2015).

Результаты диссертации использованы при разработке лазеров в ОАО «Пеленг», что подтверждено актами внедрения (4 акта внедрения).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 13 работах, в числе которых 4 статьи в научных журналах из перечня ВАК, 4 статьи в сборниках материалов конференций, 1 тезис доклада конференций, 2 патента на изобретение и 2 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников, списка работ автора и приложений. Полный объем диссертации составляет 135 страниц, включая 57 рисунков и 19 таблиц, занимающих 33 страницы, список использованных источников из 134 наименований на 11 страницах, список публикаций соискателя ученой степени из 13 наименований на 2 страницах, 1 приложение на 4 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **главе 1** проведен обзор существующих непрерывных лазеров для СДУ, а также рассмотрены лазеры, которые при определенных условиях потенциально могут быть применены в таких системах.

В **разделе 1.1** рассмотрены твердотельные лазеры на неодим содержащих материалах, в том числе применявшийся в СДУ лазер с ламповой накачкой, достоинством которого является использование недорогих и широкодоступных материалов и комплектующих, а также сравнительно низкая стоимость. В тоже время лазер обладает большим количеством недостатков, таких как высокое энергопотребление (1,5 кВт), система жидкостного охлаждения, использование высоковольтной электроники, отсутствие мгновенной готовности к работе, необходимость мощного и дорогого источника питания, низкий ресурс и др. Устранить указанные недостатки возможно при замене ламповой накачки на диодную. Однако, как показано в литературном обзоре, при диодной накачке твердотельные лазеры на основе кристаллических материалов, легированных ионами Nd^{3+} , требуют использования системы температурной стабилизации при их работе в составе СДУ вследствие узких полос поглощения ионов Nd^{3+} , и температурной зависимости длины волны широко распространенных лазерных диодов накачки. Применение неодим содержащих лазерных стекол, которые по сравнению с кристаллическими матрицами характеризуются широкими полосами поглощения, не обеспечивает требуемый для существующих СДУ уровень мощности лазерного излучения.

В **разделе 1.2** проведен обзор полупроводниковых лазеров. Показано, что инжекционные полупроводниковые лазеры с накачкой электрическим током (лазерные диоды) являются надежным, миниатюрным, высокоэффективным и дешевым источником излучения для СДУ. Наиболее пригодными для работы при воздействии большого количества факторов окружающей среды являются лазерные диоды в герметичном корпусе с волоконным выводом излучения, однако температурный дрейф длины волны генерируемого излучения является достаточно серьезным сдерживающим фактором для их применения в СДУ в качестве самостоятельного источника излучения.

В **разделе 1.3** рассмотрены волоконные лазеры, в том числе применявшийся в СДУ лазер на основе стеклянного волокна, легированного ионами Yb^{3+} . По сравнению с твердотельным лазером с ламповой накачкой из-за применения диодной накачки, пассивного теплоотвода и цельно волоконного исполнения резонатора волоконный лазер для СДУ обладает следующими достоинствами: низкое энергопотребление; простой, дешевый, низковольтный и компактный источник питания; длительный срок службы и высокая надежность; отсутствие длительных перерывов в работе лазера; относительно «гибкая» конструкция и возможность применения в переносных

СДУ. Основными недостатками волоконного лазера являются высокая стоимость и высокая для СДУ длина когерентности генерируемого излучения, приводящая к появлению «паразитных» интерференционных эффектов (снижают надежность комплекса «СДУ – управляемый объект»), для устранения которых необходимо использовать дополнительное, усложняющее конструкцию прибора, устройство оптического разделения лазерного пучка.

В **разделе 1.4** показана перспективность создания твердотельного лазера для СДУ на основе кристаллических активных сред, легированных ионами Yb^{3+} .

В **главе 2** описаны применяемое при исследованиях оборудование и разработанные автором диссертации установки для измерения характеристик лазерного излучения и установки для исследования лазеров и лазерных диодов накачки в широком диапазоне температур и при воздействии механических нагрузок, которые обеспечивали решение основных задач диссертационной работы.

При исследованиях регистрировались мощность генерируемого излучения и излучения накачки (измеритель мощности Coherent LabMax-TOP с измерительным датчиком LM-10 HTD), спектральные характеристики генерации и накачки (спектрометры SolarLS SDH-IV и SolarLS S100-2048), пространственные характеристики генерируемого излучения (анализатор Ophir SP620U с программным обеспечением BeamGage Standart). Спектральные характеристики зеркал резонатора и оптических элементов измерительных установок проверялись на спектрофотометре Cary 5000.

Диапазон изменения температуры при исследованиях составлял от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (камера тепла и холода ESPEC SU-661). Исследование работоспособности лазера и лазерных диодов накачки при воздействии вибрационных нагрузок проводилось с ускорением 4g в полосе частот от 50 Гц до 80 Гц (вибростенд ВЭДС-1500) и при воздействии ударных нагрузок с ускорением 50g длительностью ударного импульса 3 мс (стенд ударных нагрузок STT 500).

Принцип регистрации характеристик излучения в разработанных измерительных установках соответствует СТБ ИСО 11146-1-2006, СТБ ИСО 11146-3-2004, СТБ ИСО 13694-2004.

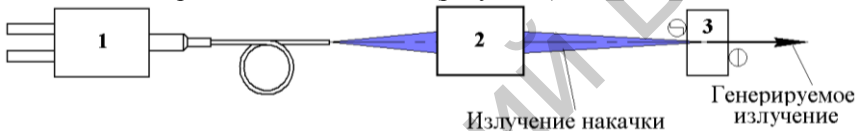
В **главе 3** для устранения эксплуатационных недостатков твердотельного неодимового лазера с ламповой накачкой и волоконного лазера на основе иттербиевого волокна, которые применялись в СДУ, автором диссертации разработан базовый подход по созданию нового лазера для СДУ:

– отсутствие инерционных систем, т.е. отсутствие систем температурной стабилизации, охлаждения или нагрева лазера, и организация пассивного теплоотвода от всех элементов конструкции, что позволяет обеспечить мгновенную готовность СДУ к работе и снизить ее энергопотребление;

– использование продольной накачки лазерными диодами с волоконным выводом излучения в совокупности с неразъюстируемым резонатором микрочип конфигурации, что обеспечивает надежность и длительный срок службы лазера, минимальные габаритные размеры системы, простоту конструкции и минимальное количество юстировочных операций, низкое энергопотребление и отсутствие высоковольтной электроники в составе СДУ;

– применение в конструкции лазера только коммерчески доступных и широко распространенных материалов и комплектующих для снижения стоимости.

В данной диссертационной работе под микрочип лазер понимается твердотельный лазер с продольной диодной накачкой, резонатор которого является монокристаллическим и образован диэлектрическими зеркалами, нанесенными непосредственно на две рабочие грани активного элемента, выполненного в виде плоскопараллельной пластинки (рисунок 1).



1 – лазерный диод накачки с волоконным выводом; 2 – оптическая система накачки;
3 – активный элемент с зеркалами резонатора

Рисунок 1. – Структурная схема микрочип лазера

На активном элементе со стороны источника накачки нанесено спектроразделительное покрытие с коэффициентом отражения близким к 1 для длины волны генерируемого излучения и пропусканием около 100 % для длины волны накачки, с противоположной стороны активного элемента – светоразделительное покрытие (полупрозрачное зеркало) с требуемым для работы лазера коэффициентом отражения на длине волны генерируемого излучения.

Также в главе 3 выполнен энергетический расчет СДУ для определения требуемого уровня мощности генерируемого излучения разрабатываемого лазера; проведен обзор и сравнение с точки зрения применения в лазере для СДУ коммерчески доступных активных сред, легированных ионами Yb^{3+} , и лазерных диодов накачки с волоконным выводом излучения. На основании проведенного обзора выбран материал активной среды и лазерные диоды накачки, при использовании которых проведено теоретическое моделирование и экспериментальное исследование работы микрочип лазера с продольной диодной накачкой в широком температурном диапазоне.

В разделе 3.1 проведен энергетический расчет для двух типовых СДУ (условное обозначение по тексту диссертации «СДУ тип 1» и «СДУ тип 2») при П-образном и Гауссовом пространственном профиле распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка. Показано, что в зависимости от пространственного профиля пучка и коэффициента пропуска-

ния конкретной СДУ (в расчетах использовались коэффициенты пропускания для уже существующих систем) необходимая мощность источника излучения варьируется в диапазоне от 3,3 Вт до 5,92 Вт для СДУ тип 1, и от 0,78 Вт до 1,45 Вт для СДУ тип 2. Для СДУ тип 1 предпочтительным является Гауссово распределение интенсивности, для СДУ тип 2 – П-образное.

В разделе 3.2 проведено сравнение коммерчески доступных иттербиевых кристаллических активных сред для разрабатываемого микрочип лазера по физическим и спектроскопическим свойствам. Также учитывались цена активной среды и количество производителей, что немаловажно при серийном изготовлении. Наиболее предпочтительным материалом активного элемента для лазера, который предназначен для работы в широком температурном диапазоне без системы температурной стабилизации, является кубический кристалл $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$, характеризующийся высокой теплопроводностью и термостойкостью, высокой эффективностью поглощения накачки, низким температурным подзаселением нижнего лазерного уровня и структурированным спектром сечения стимулированного излучения. Дополнительное преимущество кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ по сравнению с остальными коммерчески доступными активными средами – широкая представленность на рынке и низкая стоимость, а также тот факт, что $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ является наиболее изученным иттербиевым лазерным материалом.

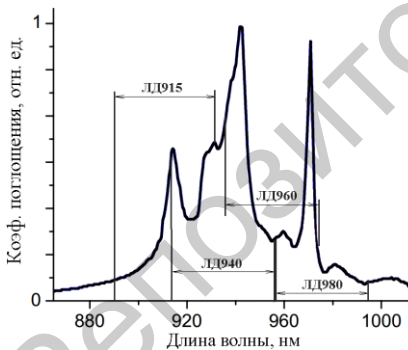


Рисунок 2. – Спектр поглощения $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ и рабочий спектральный диапазон коммерчески доступных лазерных диодов накачки

В разделе 3.3 определен источник накачки для разрабатываемого лазера и проведена проверка его работоспособности в условиях воздействия факторов окружающей среды.

Источником накачки выбран коммерчески доступный лазерный диод номинальной мощностью 8 Вт с волоконным выводом излучения диаметром 100 мкм с числовой апертурой 0,15 и номинальной длиной волны 940 нм, спектр излучения которого в широком температурном диапазоне обеспечивает наилучшее перекрытие со спектром поглощения $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ (рисунок 2).

При проведении испытаний лазерных диодов на устойчивость к воздействию факторов окружающей среды количество отказов составило 1,15 % при общем количестве лазерных диодов, подвергнутых испытаниям, 260 шт. Результаты испытаний свидетельствуют о надежности и пригодности использования выбранных лазерных диодов в качестве источника накачки для разрабатываемого лазера для СДУ.

В разделе 3.4 представлены результаты теоретического моделирования и экспериментального исследования работы микрочип лазера на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ с продольной диодной накачкой одним лазерным диодом номинальной мощностью 8 Вт в широком температурном диапазоне.

Работа лазера на кристалле $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ при непрерывной диодной накачке теоретически анализировалась в рамках системы балансных уравнений для квазирезонансной среды в плосковолновом приближении. Моделирование проводилось для постоянного значения падающей мощности накачки – 6 Вт. Спектральная ширина излучения накачки в математической модели не учитывалась. Соотношение между объемами мод накачки и генерации внутри активного элемента принималось равным 1 (т.е. предполагалось, что конфокальный параметр пучка накачки в кристалле больше длины активного элемента). Диаметр перетяжки излучения накачки внутри активного элемента принимался равным 230 мкм.

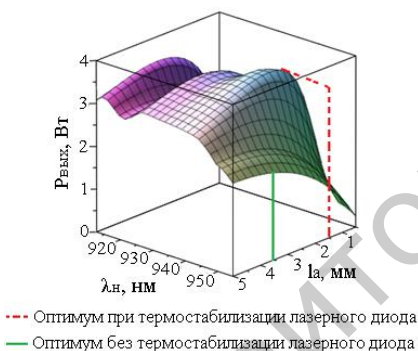


Рисунок 3. – Зависимость выходной мощности микрочип лазера $P_{\text{вых}}$ от длины волны накачки λ_n и длины активного элемента l_a

Полученные в результате теоретического моделирования непрерывного режима генерации параметры элементной базы $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Оптимальные расчетные параметры элементной базы $\text{Yb}:\text{YAG}$ микрочип лазера

Концентрация ионов Yb^{3+}	Коэффициент пропускания оптимального зеркала	Оптимальная длина активного элемента, мм	Минимальная мощность генерации, Вт	Неравномерность выходной мощности, %
5 ат.%	0,1	5,0	1,63	52,5
10 ат.%	0,05	3,5	2,19	37,2
15 ат.%	0,05	2,5	2,16	30,8

Для всех рассмотренных концентраций ионов Yb^{3+} и всех значений пропускания выходного зеркала оптимальная длина активной среды с точки зрения работы лазера в широком температурном диапазоне больше оптимальной длины активного элемента при работе лазера в идеальных условиях, т.е. при термостабилизации лазерного диода накачки и фиксации его длины волны на спектральный максимум поглощения. На рисунке 3 для примера приведена зависимость выходной мощности для $\text{Yb}(10 \text{ ат.}\%):\text{YAG}$ микрочип лазера с пропусканием выходного зеркала 5 %.

По результатам численного моделирования наибольший интерес представляли активные элементы с концентрацией ионов 10 ат.% и 15 ат.%. Поэтому экспериментальные исследования проводились только с указанными концентрациями ионов Yb^{3+} .

При экспериментальном исследовании реализован режим непрерывной генерации Yb^{3+} :YAG микрочип лазера в диапазоне температур окружающей среды от $-50\text{ }^\circ\text{C}$ до $+65\text{ }^\circ\text{C}$ без применения системы температурной стабилизации. Экспериментальные результаты подтвердили воспроизводимость на практике результатов математического моделирования для длины активных элементов менее 3,0 мм. Максимальная разница между экспериментальными и расчетными значениями составила около 9 %. При длине активного элемента более 3,0 мм отличие экспериментальных и теоретических результатов связано с ухудшением пространственного согласования моды накачки и моды генерации в активном элементе (при использовании лазерных диодов накачки с волоконным выводом диаметром 100 мкм с числовой апертурой 0,15 и при диаметре перетяжки излучения накачки 230 мкм значение конфокального параметра составляет около 3,0 мм).

Параметры элементной базы Yb^{3+} :YAG микрочип лазера по результатам его экспериментального исследования при фокусировке излучения накачки в пятно $\text{Ø}230\text{ мкм}$ и экспериментальные зависимости мощности генерируемого излучения от длины волны накачки для данных параметров элементной базы приведены на рисунке 4 и в таблице 2.

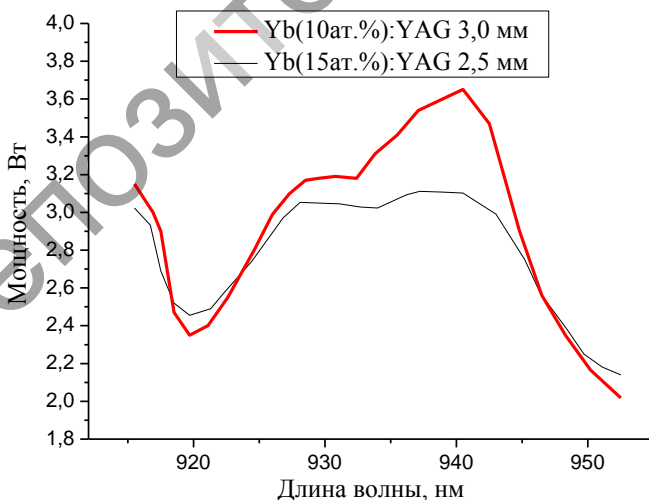


Рисунок 4. – Экспериментальная зависимость выходной мощности Yb :YAG микрочип лазера от длины волны накачки

Таблица 2. – Оптимальные экспериментальные параметры элементной базы Yb:YAG микроchip лазера при фокусировке излучения накачки в пятно Ø230 мкм

Концентрация ионов Yb ³⁺	Коэффициент пропускания выходного зеркала	Длина активного элемента, мм	Минимальная мощность генерации, Вт	Неравномерность выходной мощности, %	Длина волны генерации, мкм	Спектральная полуширина генерируемого излучения, нм
10 ат.%	0,05	3,0	2,02	45	1,05	1,5
15 ат.%	0,05	2,5	2,14	31	1,05	1,5

Для СДУ кроме мощности важным параметром являются пространственные характеристики лазерного излучения, результаты экспериментального исследования которых показаны на рисунке 5.

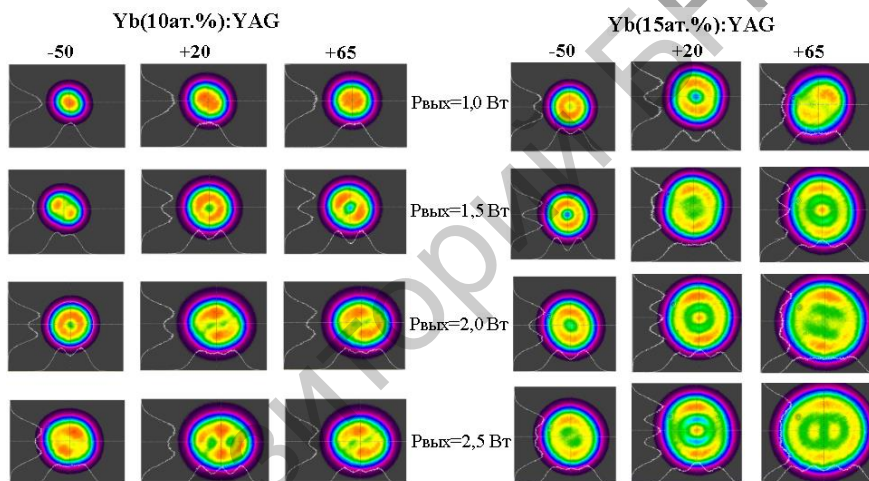


Рисунок 5. – Профиль лазерного пучка при различных температурах и значениях мощности генерируемого излучения при фокусировке излучения накачки в пятно Ø230 мкм

Пространственные характеристики генерируемого излучения при фокусировке пучка накачки в пятно Ø230 мкм значительно зависят как от уровня мощности генерируемого излучения, так и от температуры окружающей среды, что является следствием термооптических эффектов в активной среде. В диссертационной работе теоретически показано и экспериментально подтверждено, что пространственные характеристики генерируемого Yb³⁺:YAG микроchip лазером излучения будут меньше зависеть от мощности накачки при увеличении «остроты» ее фокусировки. Пространственное распределение интенсивности лазерного пучка для различных уровней мощности и температур окружающей среды при фокусировке излучения накачки в пятно Ø100 мкм показано на рисунке 6.

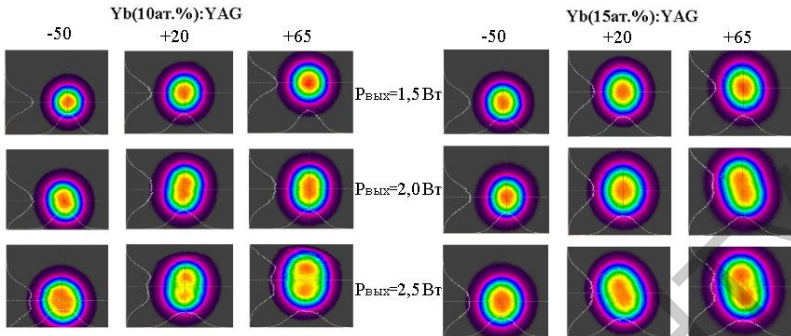


Рисунок 6. – Профиль лазерного пучка при различных температурах и значениях мощности генерируемого излучения при фокусировке излучения накачки в пятно $\varnothing 100$ мкм

Увеличение «остроты» фокусировки позволило повысить мощность генерируемого излучения в минимумах поглощения иона Yb^{3+} для $\text{Yb}(15 \text{ ат. \%})\text{:YAG}$ микрочип лазера при ухудшении ее равномерности. Для $\text{Yb}(10 \text{ ат. \%})\text{:YAG}$ также было получено ухудшение равномерности выходной мощности, при этом ее прирост в минимумах поглощения иона Yb^{3+} не был зафиксирован. Экспериментальные зависимости выходной мощности лазера от длины волны накачки при фокусировке излучения накачки в пятно $\varnothing 100$ мкм показаны на рисунке 7.

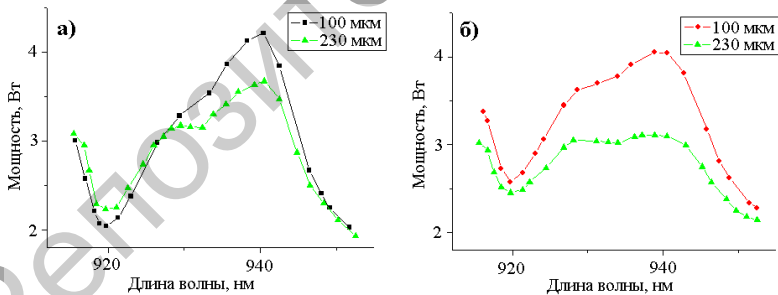


Рисунок 7. – Выходная мощность лазера в зависимости от длины волны накачки при различной фокусировке излучения накачки
а) $\text{Yb}(10 \text{ ат. \%})\text{:YAG}$; б) $\text{Yb}(15 \text{ ат. \%})\text{:YAG}$

В результате численного моделирования и экспериментального исследования генерационных характеристик $\text{Yb}^{3+}\text{:YAG}$ микрочип лазера показано, что:

– параметры активного чипа $\text{Yb}^{3+}\text{:YAG}$ микрочип лазера, такие как концентрация активных центров, толщина элемента и коэффициент пропускания выходного зеркала должны выбираться по характеристикам генерируемого излучения при накачке в минимумах полос поглощения ионов Yb^{3+} ;

– для эффективной работы $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера в широком температурном диапазоне концентрация ионов Yb^{3+} в кристалле должна составлять 10–15 ат.%, коэффициент пропускания выходного зеркала – 5 %;

– фокусировка излучения накачки в пятно $\text{Ø}230$ мкм обеспечивает генерацию выходного пучка лазера с пространственным профилем интенсивности близким к П-образному, который является предпочтительным для СДУ тип 2; фокусировка излучения накачки в пятно $\text{Ø}100$ мкм обеспечивает Гауссов пространственный профиль интенсивности, который является предпочтительным для СДУ тип 1;

– при фокусировке накачки в пятно $\text{Ø}230$ мкм оптимальная мощность генерируемого излучения с точки зрения постоянства пространственных характеристик и простоты источника электропитания лазерного диода накачки составляет 2 Вт; при фокусировке накачки в пятно $\text{Ø}100$ мкм – 1,5–2,0 Вт (в зависимости от температуры);

– полученные характеристики генерируемого излучения удовлетворяют требованиям к СДУ тип 2, а для применения в СДУ тип 1 требуется увеличение уровня выходной мощности лазера.

Глава 4 посвящена способам увеличения выходной мощности $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера:

– увеличение мощности накачки в пределах одной прокачиваемой зоны при суммировании излучения от нескольких источников, что приводит к генерации одного высокомощного лазерного пучка (схема $n \times 1$, где n – количество источников накачки);

– мультипликация прокачиваемых зон в пределах одного активного элемента микрочип лазера (прокачка нескольких областей активного элемента), в результате чего происходит генерация нескольких лазерных пучков, оси которых параллельны между собой (схема $n \times m$, где m – количество генерируемых лазерных пучков, в общем случае $m \neq n$).

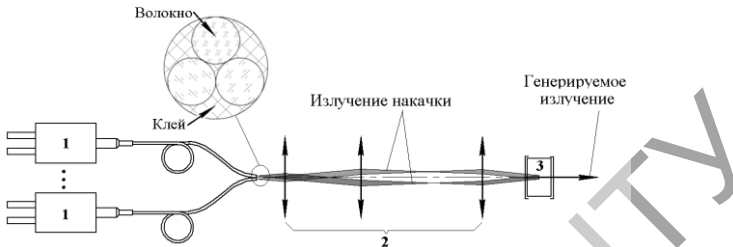
Принцип мультипликации прокачиваемых зон и схемное решение для его реализации предложены автором диссертации впервые и защищены патентами.

В **разделе 4.1** предложено и практически реализовано два варианта схемы $n \times 1$:

– при использовании коммерчески доступных высокомощных лазерных диодов с волоконным выводом излучения с выходной мощностью 25 Вт и более, которые представляют собой сборку на едином основании нескольких одиночных лазерных диодов, излучение от которых вводится в единое оптическое волокно при помощи сложной многокомпонентной оптической системы;

– при применении нескольких лазерных диодов накачки с волоконным выводом, излучение которых объединяется внутри активного элемента оптической системой. Реализована схема с тремя лазерными диодами номиналь-

ной мощностью 8 Вт при использовании трехлинзовой оптической системы накачки, предложенной и рассчитанной автором диссертации (рисунок 8).



1 – ЛД накачки с волоконным выводом; 2 – оптическая система накачки;
3 – активный элемент с зеркалами резонатора

Рисунок 8. – Схема $n \times 1$ $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера для СДУ при использовании трех лазерных диодов мощностью 8 Вт

Генерационные характеристики $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазеров, реализованных по схеме $n \times 1$, при температуре 20°C показаны на рисунках 9 и 10.

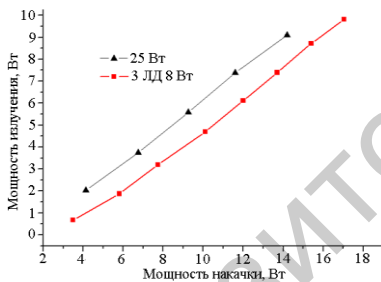


Рисунок 9. – Схема $n \times 1$. Мощность генерируемого излучения

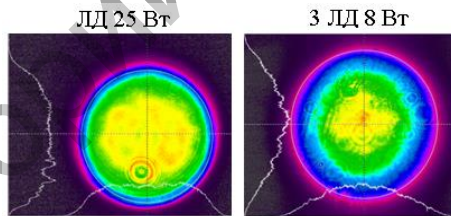


Рисунок 10. – Схема $n \times 1$. Пространственные характеристики генерируемого излучения

Запас по мощности накачки при температуре 20°C является достаточным для поддержания требуемого для СДУ тип 1 уровня мощности генерации в широком диапазоне температур. При выходной мощности 6 Вт (максимальное расчетное требование по выходной мощности для СДУ тип 1 составляет 5,92 Вт при П-образном распределении интенсивности) мощность накачки составляет менее 12 Вт, т.е. обеспечен двукратный запас по мощности накачки. Схема с одним оптическим волокном (лазерный диод мощностью 25 Вт) по сравнению со схемой суммирования излучения от нескольких волокон обладает преимуществом по эффективности преобразования мощности накачки в мощность генерируемого излучения (оптическая эффективность) из-за лучшего согласования моды накачки и моды генерации внутри активного элемента, при этом дифференциальная эффективность (угол наклона зависимостей) одинакова для двух схем. Разница в выходной мощности лазеров при одина-

ковой мощности накачки составляет около 1,6 Вт. Однако, как показано в диссертационной работе, коммерчески доступные лазерные диоды мощностью 25 Вт характеризуются низкой надежностью при воздействии факторов окружающей среды, поэтому их применение в лазере для СДУ неоправданно.

Таким образом, предложенное схемное решение увеличения мощности генерируемого излучения за счет увеличения мощности накачки в пределах одной прокачиваемой зоны при использовании нескольких ЛД мощностью 8 Вт позволяет реализовать лазер для СДУ «тип 1» и «тип 2». В тоже время, как было показано в диссертационной работе, энергетическая асимметрия суммарного пучка накачки внутри активного элемента для схемы $n \times 1$ с несколькими лазерными диодами мощностью 8 Вт приводит к ухудшению пространственного распределения интенсивности, и требует в конечном счете подбор диодов с близкими энергетическими и спектральными характеристиками, либо независимый канал питания для каждого диода.

С целью минимизации данных недостатков схемы $n \times 1$ с несколькими лазерными диодами мощностью 8 Вт, а также для увеличения надежности СДУ в целом, впервые предложена схема микроchip лазера с продольной диодной накачкой нескольких зон одного активного элемента на основе кристалла $Yb^{3+}:YAG$, результаты экспериментального исследования которой приведены в разделе 4.2.

Применение в СДУ лазеров, генерирующих несколько лазерных пучков, позволяет снизить требования к лучевой стойкости оптических покрытий на отдельных оптических элементах СДУ, в том числе и лазера, а также к чистоте оптических поверхностей и материалов. При использовании нескольких лазерных пучков снижается вероятность появления паразитной интерференционной картины в плоскости управляемого объекта (указанный ранее недостаток волоконного лазера для СДУ). Из недостатков применения нескольких лазерных пучков в СДУ стоит отметить только некоторое увеличение размеров световых диаметров оптических элементов СДУ по сравнению со случаем использования одного пучка при прочих равных.

Для реализации принципа мультипликации прокачиваемых зон была разработана схема лазера с количеством пучков генерации равным количеству пучков накачки (схема $n \times n$), которая показана на рисунке 11.

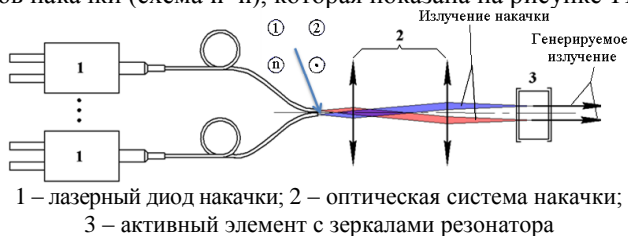


Рисунок 11. – Схема $n \times n$ $Yb^{3+}:YAG$ микроchip лазера для СДУ

При исследовании схемного решения $n \times n$ было установлено взаимное влияние соседних прокачиваемых зон на энергетические характеристики генерируемого излучения. Экспериментально определена зависимость изменения выходной мощности при прокачке двух зон $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера от расстояния между ними (рисунок 12).

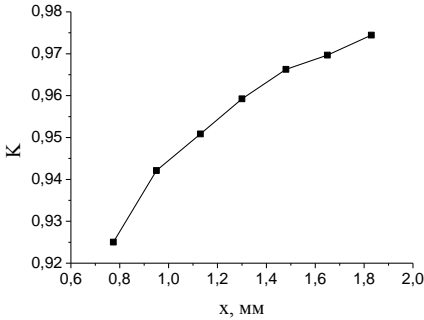


Рисунок 12. – Зависимость коэффициента влияния K от расстояния между прокачиваемыми областями x

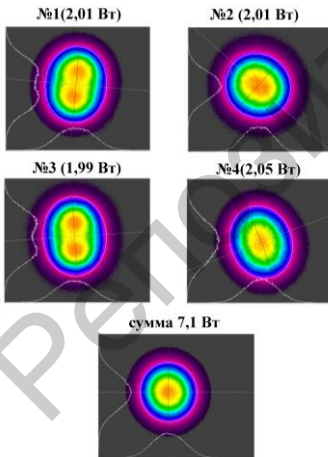


Рисунок 13. – Пространственный профиль лазерного пучка при прокачке четырех зон

Для удобства интерпретации полученных результатов был введен коэффициент влияния K , определяемый как:

$$K = P_{\Sigma} / (P_1 + P_2), \quad (1)$$

где P_{Σ} – генерируемая мощность при прокачке двух зон одновременно, P_1 – генерируемая мощность при накачке только первым лазерным диодом, P_2 – генерируемая мощность при накачке только вторым лазерным диодом.

Экспериментально определена зависимость изменения выходной мощности $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера от количества прокачиваемых областей:

$$K_n = (K_2)^{n-1}, \quad (2)$$

где K_n – суммарный коэффициент влияния при прокачке n зон ($n \geq 2$), K_2 – коэффициент влияния при прокачке двух зон.

Кроме эффекта взаимного влияния прокачиваемых областей на энергетические характеристики был обнаружен эффект взаимного влияния прокачиваемых зон на пространственные характеристики генерируемого излучения. На рисунке 13 показаны пространственные профили лазерных пучков в поперечном сечении при прокачке четырех областей для случаев отдельной i -й зоны в отсутствие прокачки остальных зон (№1–№4, в скобках – мощность излучения) и суммарное пространственное распределение интенсивности при прокачке четырех зон одновременно (внизу рисунка). Пространственное распределение интенсивности регистрировалось в фокальной плоскости линзы ($f^* = 100$ мм). Расчетный диаметр перетяж-

ки пучков накачки составлял около 100 мкм. Пространственное расположение осей прокачиваемых областей внутри активного элемента в его поперечном сечении соответствовало вершинам квадрата с диагональю 1,4 мм.

Установлено, что изменение суммарного пространственного распределения интенсивности обусловлено изменением пространственного профиля отдельного лазерного пучка при наличии прокачки соседних зон, что, в свою очередь, предположительно, связано с более равномерным профилем локально наведенной термолинзы в случае прокачки соседних участков активного элемента.

Главным результатом обнаружения эффекта взаимного влияния прокачиваемых зон друг на друга и на суммарные пространственно-энергетические характеристики генерируемого излучения при разработке лазеров для СДУ стала возможность получения Гауссова профиля распределения интенсивности, который является предпочтительным для СДУ тип 1, при значительно больших мощностях накачки в одной прокачиваемой области, чем для случая отсутствия прокачки соседних областей. Применение схемы $n \times n$ позволило получить суммарный Гауссов профиль распределения интенсивности при мощности генерируемого излучения около 8 Вт при температуре 20 °С при использовании четырех лазерных диодов накачки, что на 30 % больше, чем при использовании четырех лазеров с одним аналогичным лазерным диодом.

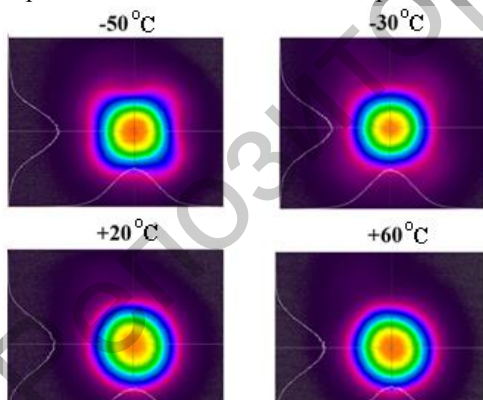


Рисунок 14. – Пространственные характеристики излучения лазера на основе схемы $n \times n$ в широком диапазоне температур

сти при выходной мощности более 6 Вт во всем рабочем температурном диапазоне, что полностью удовлетворяет всем типам и вариантам исполнения СДУ.

При работе лазера в широком температурном диапазоне пространственные характеристики генерируемого излучения оставались практически одинаковыми, что обеспечивает стабильность параметров СДУ, при этом мощность генерируемого излучения составляла от 6,5 Вт до 8 Вт в зависимости от температуры (рисунок 14).

Таким образом, при использовании схемного решения $n \times n$ разработан $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазер с Гауссовым распределением интенсивности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен принцип построения твердотельного лазера средней мощности с продольной диодной накачкой, предназначенного для работы в спектральной области около 1 мкм при воздействии механических нагрузок в широком диапазоне температур окружающей среды без применения систем принудительного охлаждения, нагрева и температурной стабилизации. Предложенный принцип заключается в использовании одиночных лазерных диодов накачки в герметичном корпусе с волоконным выводом излучения, в которых ввод излучения в волокно осуществляется напрямую без использования дополнительных оптических компонентов, и микрочип конфигурации резонатора, зеркала которого нанесены непосредственно на рабочие грани активного элемента, материалом которого является кубический кристалл $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ – активная среда с высоким коэффициентом теплопроводности, широкой полосой поглощения и структурированным спектром стимулированного излучения [1–А, 2–А, 7–А, 9–А – 13–А].

2. Изучено влияние параметров активного чипа (толщина активного элемента, пропускание выходного зеркала, концентрация активных центров) на характеристики генерируемого излучения. Показано, что в отсутствие температурной стабилизации оптимальные параметры активного чипа $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера не совпадают с оптимальными параметрами в случае селективной накачки, и их выбор должен осуществляться по характеристикам генерируемого излучения при накачке в минимумах полос поглощения ионов Yb^{3+} в спектральной области около 922 нм и 950 нм. Для эффективной работы $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера в температурном диапазоне от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в отсутствие температурной стабилизации концентрация ионов Yb^{3+} в активном элементе должна составлять 10–15 ат.%, коэффициент пропускания выходного зеркала – 5 %. [2–А, 7–А].

3. Впервые реализован режим непрерывной генерации в лазере на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ при продольной диодной накачке в диапазоне температур окружающей среды от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ без применения систем температурной стабилизации, принудительного охлаждения и нагрева составных частей лазерной системы. При использовании одного ЛД накачки с мощностью не менее 6 Вт во всем температурном диапазоне была получена генерация на длине волны 1,05 мкм с выходной мощностью не менее 2 Вт при близком к П-образному распределению интенсивности генерируемого пучка и мощностью не менее 1,5 Вт при Гауссовом распределении интенсивности [2–А, 6–А, 7–А].

4. Для повышения мощности генерируемого излучения в диапазоне температур окружающей среды от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ впервые были реали-

зованы $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ лазеры с увеличением мощности накачки в пределах одной прокачиваемой области при суммировании излучения от нескольких лазерных диодов внутри активного элемента при помощи разработанной трехлинзовой оптической системы накачки (генерация одного лазерного пучка, схема $n \times 1$). Также впервые предложена и реализована схема $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ микрочип лазера с мультипликацией прокачиваемых зон в пределах одного активного элемента (генерация нескольких лазерных пучков, схема $n \times n$). Предложенная схема обеспечивает количество генерируемых пучков равное числу пучков накачки. Оси всех генерируемых лазерных пучков параллельны между собой, т.к. имеют общий резонатор образованный зеркалами, нанесенными на грани одного активного элемента. Непараллельность пучков накачки оказывает влияние на эффективность генерации из-за ухудшения согласования мод генерации и накачки, но не на параллельность осей генерируемых пучков [3–А, 5–А, 10–А – 13–А].

5. Обнаружен эффект взаимного влияния соседних прокачиваемых зон микрочип лазера на основе кристалла $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ на энергетические и пространственные характеристики отдельного лазерного пучка и, как следствие, на характеристики суммированного излучения. Установлена зависимость изменения характеристик лазерного излучения от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. Эффект взаимного влияния соседних прокачиваемых зон позволяет получить Гауссов профиль интенсивности каждого отдельного лазерного пучка при выходной мощности на 30% выше, чем в отсутствие прокачки соседних зон для случая четырех прокачиваемых областей [4–А, 8–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационного исследования применены в ОАО «Пеленг» при разработке лазеров как для уже существующих СДУ (замена существовавших аналогов), так и для вновь разработанных систем нового конструктивного исполнения с усовершенствованными массогабаритными и энергетическими характеристиками, в которых невозможно применить предшествующие аналоги лазера.

Разработанные лазеры полностью удовлетворяют требованиям к СДУ всех типов, в том числе переносных, характеризуются простой «гибкой» конструкцией, простой технологией сборки и юстировки, высокой надежностью и долгим сроком службы, а также ремонтпригодностью собственными силами. Себестоимость изготовления разработанных лазеров (при сравнимых характеристиках генерируемого излучения) ниже покупных волоконных лазеров, незначительно выше лазера с системой охлаждения (без учета его источника питания).

На момент окончания работы над рукописью диссертации разработано 9 вариантов исполнения лазеров, в том числе по конструкции (герметич-

ный корпус, негерметичный закрытый корпус, бескорпусное исполнение) и выходной мощности (1,5 Вт; 3 Вт; 6Вт). Изготовлено более 150 шт. лазеров различных модификаций.

Применение результатов диссертационного исследования при разработке лазеров подтверждено актами внедрения (см. Приложение А диссертации), результаты интеллектуальной деятельности защищены патентами Республики Беларусь и Российской Федерации [10–А – 13–А].

Разработанная схема мультипликации прокачиваемых зон может быть применена при разработке лазеров для измерительных приборов различного назначения, в частности в приборе для определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов по предложенному автором диссертации методу [3–А].

Для усовершенствования процесса изготовления лазеров и контроля их параметров в ОАО «Пеленг» был разработан ряд новых контрольно-юстировочных приборов и стендов, а также освоены и внедрены новые для предприятия технологии, которые успешно применяются при изготовлении других опико-электронных приборов [5–А].

Обнаруженный эффект взаимного влияния прокачиваемых зон микрочип лазера представляет научный интерес и может стать основой диссертационного исследования других авторов в области физико-математических наук.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1—А. Passively Q-switched microchip Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ diode-pumped laser / V.E. Kisel, K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, A.M. Ivashko, N.V. Kuleshov, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, № 13. – P. 2745 – 2747.

2—А. Ивашко, А.М. Непрерывный Yb:YAG лазер для портативных измерительных систем / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2014. – №2 (9). – С. 17 – 23.

3—А. Ивашко, А.М. Метод определения положения фокальной плоскости фокусирующих компонентов / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 49 – 54.

4—А. Ивашко, А.М. Масштабирование выходной мощности непрерывного Yb:YAG микрочип-лазера для измерительных систем / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 222 – 227.

Статьи в сборниках материалов конференций

5—А. Ивашко, А.М. Стенд для контроля пространственного положения выходного излучения лазера / А.М. Ивашко, А.М. Тареев, А.И. Немененко, В.Э. Кисель // Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение 2013, Минск, 20–22 ноября 2013 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 60 – 61.

6—А. Ивашко, А.М. Температурная зависимость выходной мощности Yb³⁺:YAG микрочип лазера / А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции Приборостроение 2013, Минск, 20–22 ноября 2013 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 300 – 302.

7—А. Ивашко, А.М. Непрерывный Yb:YAG лазер для систем, работающих в условиях механических нагрузок в широком температурном диапазоне без принудительной термостабилизации / А.М. Ивашко, М.П. Демеш, Н.В. Гусакова, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, А.С. Руденков // Материалы 7-й МНТК Приборостроение-2014, Минск, 19–21 ноября 2014 г. / БНТУ; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 306 – 308.

8—А. Ивашко, А.М. Взаимное влияние прокачиваемых зон в непрерывном микрочип Yb:YAG лазере с продольной диодной накачкой /

А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов // Материалы 8-ой Международной научно-технической конференции в 2 томах, Том 2, Приборостроение 2015, Минск, 25–27 ноября 2015 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2015. – С. 67 – 69.

Тезисы докладов конференций

9–А. Passively Q-switched microchip Er,Yb:YAB diode-pumped laser / Viktor Kisel, Konstantin Gorbachenya, Anatoly Yasukevich, Alexey Ivashko, Nikolay Kuleshov, Viktor Maltsev, and Nikolay Leonyuk // 5th EPS-QEOD Europhoton Conference: euromphysics conference abstract, Stockholm, Sweden, Aug. 26-31, 2012 / European Physical Society. – AlbaNova University Centre, 2012. – P. WeP. 16.

Патенты

10–А. Осветительная система : пат. 19694 Респ. Беларусь, МПК G 02 F 1/01 / В.В. Батюшков, И.В. Васильева, А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, С.Б. Литвяков, А.И. Немененок, А.М. Тареев ; заявитель ОАО «Пеленг». – № a20121492 ; заявл. 26.10.2012 ; опубл. 30.06.2014 // Официальный бюл. / Нац. центр интелект. собственности. – 2014. – 6 с.

11–А. Непрерывный лазерный излучатель : пат. 9813 Респ. Беларусь, МПК H 01S 3/16 / И.В. Васильева, В.Э. Кисель, А.И. Немененок, А.М. Тареев, А.М. Ивашко, Т.В. Топленикова, А.М. Шашков ; заявитель ОАО «Пеленг». – № u 20130452 ; заявл. 29.05.2013 ; опубл. 30.12.2013 // Официальный бюл. / Нац. центр интелект. собственности. – 2013. – 5 с.

12–А. Осветительная система : пат. 2543667 Российская Фед., МПК G02B26/02 / В.В. Батюшков, И.В. Васильева, А.М. Ивашко, В.Э. Кисель, Н.В. Кулешов, С.В. Курильчик, С.Б. Литвяков, А.И. Немененок, А.М. Тареев ; заявитель ОАО «Пеленг». – № 2013140322/28 ; заявл. 30.08.2013 ; опубл. 10.03.2015 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2015. – 6 с.

13–А. Непрерывный лазерный излучатель : пат. 145469 Российская Фед., МПК H01S3/00 / И.В. Васильева, А.И. Немененок, А.М. Тареев, В.Э. Кисель, А.М. Ивашко, Т.В. Топленикова, А.М. Шашков ; заявитель ОАО «Пеленг». – № 2014116300/28 ; заявл. 22.04.2014 ; опубл. 20.09.2014 // Официальный бюл. / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – 2014. – 5 с.

РЭЗІЮМЭ

Івашка Аляксей Міхайлавіч

ЦВЕРДАЦЕЛЬНЫЯ Yb:YAG МІКРАЧЫП ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СІСТЭМ ДЫСТАНЦЫЙНАГА КІРАВАННЯ АБ'ЕКТАМІ, ЯКІЯ РУХАЮЦЦА

Ключавыя словы: ітрый-алюмініевы гранат, мікрачып лазер, дыёдная напампоўка, бесперапынны рэжым генерацыі, шырокі тэмпературны дыяпазон.

Мэта працы: распрацоўка лазераў бесперапыннага рэжыма генерацыі для сістэм дыстанцыйнага кіравання аб'ектамі, якія рухаюцца, спецыяльнага прызначэння, якія працуюць у спектральнай вобласці каля 1 мкм у шырокім тэмпературным дыяпазоне пад уздзеяннем механічных нагрузак.

Метады даследавання і апаратура: праводзілася лікавае мадэліраванне і эксперыментальнае даследаванне работы Yb³⁺:YAG мікрачып лазера ў тэмпературным дыяпазоне ад -50 °C да +60 °C. Прадметам даследавання з'яўляліся энергетычныя, прасторавыя і спектральныя характэрыстыкі лазераў, а таксама метады павышэння магутнасці генеруемага выпраменьвання.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

– упершыню рэалізаваны рэжым бесперапыннай генерацыі ў лазеры на аснове крышталю Yb³⁺:YAG пры падоўжнай дыёднай напампоўцы ў дыяпазоне тэмператур навакольнага асяроддзя ад -50 °C да +60 °C без прымянення сістэм тэмпературнай стабілізацыі, прымусовага ахалоджвання і нагрэву састаўных частак лазернай сістэмы;

– для павышэння магутнасці выпраменьвання ў шырокім дыяпазоне тэмператур рэалізаваны Yb³⁺:YAG мікрачып лазеры з павелічэннем магутнасці напампоўкі ў межах адной прапампоўваемай зоны пры сумаванні выпраменьвання ад некалькіх крыніц, і ўпершыню прапанавана і рэалізавана схема падоўжнай напампоўкі некалькіх вобласцей (мультыплікацыя прапампоўваемых вобласцей) Yb³⁺:YAG мікрачып лазера;

– выяўлены эфект узаемнага ўплыву суседніх прапампоўваемых вобласцей мікрачып лазера на аснове крышталю Yb³⁺:YAG на энергетычныя і прасторавыя характэрыстыкі лазернага пучка. Устаноўлена залежнасць змянення характарыстык лазернага выпраменьвання ад адлегласці паміж суседнімі прапампоўваемымі вобласцямі і ад іх колькасці. Эфект узаемнага ўплыву суседніх прапампоўваемых вобласцей дазволіў атрымаць Гаусаў профіль інтэнсіўнасці лазернага пучка з магутнасцю на выхадзе на 30 % болей, чым ў адсутнасці прапампоўкі суседніх вобласцей.

Рекамендацыі па выкарыстанні і галіна ужывання: вынікі даследавання выкарыстаны пры распрацоўцы лазераў для сістэм дыстанцыйнага кіравання спецыяльнага прызначэння.

РЕЗЮМЕ

Ивашко Алексей Михайлович

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ Yb:YAG МИКРОЧИП ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

Ключевые слова: иттрий-алюминиевый гранат, микрочип лазер, диодная накачка, непрерывный режим генерации, широкий температурный диапазон.

Цель работы: разработка лазеров непрерывного режима генерации для систем дистанционного управления движущимися объектами специального назначения, работающих в спектральной области около 1 мкм в широком температурном диапазоне и при воздействии механических нагрузок.

Методы исследования и аппаратура: проводилось численное моделирование и экспериментальное исследование работы Yb³⁺:YAG микрочип лазера в температурном диапазоне от -50 °С до +60 °С. Предметом исследования являлись энергетические, пространственные и спектральные характеристики лазеров, а также методы повышения выходной мощности генерируемого излучения.

Полученные результаты и их новизна:

– впервые реализован режим непрерывной генерации в лазере на основе кристалла Yb³⁺:YAG при продольной диодной накачке в диапазоне температур окружающей среды от -50 °С до +60 °С без применения систем температурной стабилизации, принудительного охлаждения и нагрева составных частей лазерной системы;

– для повышения мощности излучения в широком диапазоне температур реализованы Yb³⁺:YAG микрочип лазеры с увеличением мощности накачки в пределах одной прокачиваемой зоны при суммировании излучения от нескольких источников, и впервые предложена и реализована схема продольной накачки нескольких зон (мультипликация прокачиваемых зон) Yb³⁺:YAG микрочип лазера;

– обнаружен эффект взаимного влияния соседних прокачиваемых зон микрочип лазера на основе кристалла Yb³⁺:YAG на энергетические и пространственные характеристики лазерного пучка. Установлена зависимость изменения характеристик лазерного излучения от расстояния между соседними прокачиваемыми областями и их количеством. Эффект взаимного влияния соседних прокачиваемых зон позволил получить Гауссов профиль интенсивности лазерного пучка при выходной мощности на 30 % выше, чем в отсутствие прокачки соседних зон.

Рекомендации по использованию и область применения: результаты исследования применены при разработке лазеров для систем дистанционного управления специального назначения.

SUMMARY

Ivashko Aleksei Mikhailovich

SOLIDE-STATE Yb:YAG MICROCHIP LASERS FOR APPLICATIONS IN MOVING OBJECTS REMOBT CONTROL SYSTEMS

Keywords: yttrium-aluminum garnet, microchip laser, diode pumping, continuous-wave generation, wide temperature range.

The aim of this work is to develop continuous-wave lasers emitting in the 1- μm spectral region within wide temperature range and under influence on mechanical strength for applications in moving objects remote control systems.

Research methods and equipment: continuous-wave generation of microchip laser was theoretically and experimentally investigated in wide temperature range from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The subjects of research were the energy, spatial and spectral characteristics of the developed microchip lasers, as well as methods of increasing the microchip lasers output power.

Obtained results and novelty:

– continuous-wave laser operation of longitudinally diode-pumped Yb^{3+} :YAG microchip laser was demonstrated for the first time to the best of our knowledge in the environment temperature range from $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ without utilization of any thermal control or thermal stabilization methods;

– laser output power scalability was demonstrated under increasing of pump power by summarizing of radiation from several pump sources both for within one emitting region in the gain crystal and, for the first time to our knowledge, for pumping of the separate zone in one gain crystal that provides simultaneous generation of multiple laser beams from Yb^{3+} :YAG microchip laser;

– influence of neighboring pumped regions on energy and spatial beams parameters of Yb:YAG microchip laser was observed. The dependences of laser output power from distance between neighboring pumped regions and their number were determined. Demonstrated mutual influence of neighboring pumped regions in the longitudinally diode pumped Yb:YAG microchip laser allow as to generate diffraction limited Gaussian beam with 30 % higher continuous-wave output power that in case of one pumped zone.

Recommendation for use and application area: obtained results have been utilized in developments of new laser sources for applications in moving objects remote control systems.

Научное издание

ИВАШКО Алексей Михайлович

**ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ Yb:YAG МИКРОЧИП ЛАЗЕРЫ ДЛЯ СИСТЕМ
ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖУЩИМИСЯ
ОБЪЕКТАМИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.07 –

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы