

*На правах рукописи*

ВОЛКОВ Михаил Романович

**ПОДАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ  
В ИТТЕРБИЕВЫХ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРАХ  
КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

01.04.21 — лазерная физика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), г. Нижний Новгород.

Научный руководитель:	Мухин Иван Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».
Официальные оппоненты:	Савикин Александр Павлович, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского";  Яшин Владимир Евгеньевич, доктор физико-математических наук, ведущий инженер, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Защита состоится "5" октября 2020 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ РАН.  
Автореферат разослан "1" сентября 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Предмет исследования и актуальность темы

Источники лазерного излучения высокой средней и пиковой мощности нашли применение в широком кругу практических задач (томография в медицине, интроскопия в сфере безопасности, обработка материалов в промышленности). Специфика лазеров, работающих с высокой средней мощностью – это неизбежный нагрев активной среды, как следствие – тепловые эффекты, ухудшающие качество лазерного пучка и ограничивающие максимальную мощность. Для её повышения необходимо минимизировать источники тепла и потери излучения в активных средах лазеров.

Концепция дискового лазера – одна из нескольких, демонстрирующих рекордные на настоящее время мощности излучения [1]. В качестве активной среды, как правило, используется алюмоиттриевый гранат, легированный иттербием (Yb:YAG). Увеличение мощности дискового лазера достигается, как правило, повышением концентрации иона-активатора, и/или увеличением апертуры активного элемента. Первое приводит к появлению дополнительных источников тепла [2], второе – к усугублению эффекта усиленного спонтанного излучения [3, 4]. На сегодняшний день нет достоверного объяснения механизма дополнительных источников. В диссертационной работе разработан оригинальный способ исследования материалов на предмет силы этого эффекта, а также предложены некоторые способы его уменьшения.

Также актуальной задачей является применение новых материалов для дисковых лазеров, обладающих улучшенными тепловыми или спектральными характеристиками. Такие материалы как Yb:LuAG или Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обладают значительно большей теплопроводностью. Применение керамических лазерных сред с разупорядоченной структурой (например, Yb:(LuYSc)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) позволяет значительно увеличить ширину полосы усиления. Необходимо иметь простые и надёжные методы контроля и измерения лазерных характеристик новых сред. В диссертационной работе разработаны новые и оптимизированы известные методы измерения различных характеристик лазерных сред, легированных иттербием и исследован ряд материалов.

Другой важной научной проблемой дисковых лазеров является повышение их характеристик при работе в импульсном режиме. Для продвижения импульсно-периодических дисковых лазеров в суб-кВт диапазон применяются криогенные технологии охлаждения активного элемента, что значительно усложняет конструкцию и возможности использования таких лазеров. Запасание энергии в тонком дисковом элементе ограничено его малой толщиной, которая необходима для эффективного охлаждения. Таким образом, задача работы дисковых лазеров в одновременно с высокой средней и пиковой мощностью является по-прежнему актуальной. Применение композитных активных элементов позволяет увеличить запасаемую энергию, однако, приводит к

термонаведенным искажениям излучения. В работе предложен новый тип композитных дисковых активных элементов из Yb:YAG/sapphire с уменьшенной величиной термонаведённых искажений.

Многие приложения дисковых лазеров требуют средней мощности излучения вплоть до десятков кВт с высокой яркостью лазерного пучка. Несмотря на известное принципиальное устройство дисковых лазеров, технология их изготовления с мульти-кВт выходной мощностью и более доступна только двум немецким компаниям (Trumpf, Dausinger&Giesen). Отметим, что в России практически не ведется исследований по созданию высокомошных твердотельных лазеров. Поэтому, повышение технологического уровня при исследовании и улучшении дисковых лазеров является одной из актуальных задач. Так, одной из специфик дискового лазера является малый коэффициент усиления излучения за проход активного элемента. В результате, в дисковых лазерах, как правило, применяются устойчивые лазерные резонаторы. С учётом масштабирования дисковых лазеров путём увеличения рабочей апертуры, начиная с уровня мощности в несколько кВт, встаёт проблема согласования диаметра основной моды устойчивого резонатора с диаметром накачки. Применение различного рода адаптивной оптики позволяет продвинуться в больший диапазон мощностей, но не решает проблемы сильного усложнения юстировки лазера. Эта проблема может быть решена применением неустойчивого резонатора. Однако малая величина усиления не позволяет совмещать дисковый квантрон и неустойчивый лазерный резонатор напрямую. Таким образом, повышение средней мощности и яркости дисковых лазеров по-прежнему является актуальной задачей.

### **Цель работы**

Целью настоящей диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое исследование тепловых и лазерных характеристик дисковых активных элементов, а также применение таких элементов для генерации и усиления излучения в условиях высокой средней по времени мощности. В частности, исследование таких основных характеристик легированных иттербием лазерных сред, как сечение усиления, время жизни, потери на поглощение, эффект дополнительного тепловыделения. Разработка оптимальных способов накачки и охлаждения дисковых активных элементов и путей подавления возникающих термонаведенных искажений излучения. Применение выполненных исследований и разработок для создания лазеров с высокой средней мощностью. Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Выполнено исследование лазерных и термооптических характеристик активных сред, легированных иттербием. Разработаны способы контроля и подавления эффекта дополнительного тепловыделения. Оптимизирован способ измерения лазерных характеристик. С помощью разработанных мето-

дов и подходов исследованы лазерные и термооптические характеристики ряда новых лазерных сред.

2. Разработаны и исследованы различные способы монтажа (пайка, клейка) дискового активного элемента на высокотеплопроводный радиатор. Также исследовано влияние охлаждения дисковых активных элементов на эффективность генерации излучения. Исследованы особенности термонаведенных фазовых искажений излучения в дисковых и композитных дисковых активных элементах, включая новую композитную структуру Yb:YAG/sapphire. На основе выполненных исследований разработаны дисковые лазерные квантроны, демонстрирующие эффективную лазерную генерацию.

3. Разработан дисковый лазер кВт уровня средней мощности с высокой оптической эффективностью. Для повышения оптического качества (величины  $M^2$ ) генерируемого излучения дисковых лазеров предложена и экспериментально реализована оригинальная схема неустойчивого кольцевого резонатора с применением многопроходной геометрии.

### **Научная новизна**

Научная новизна данной работы подтверждается большим числом работ по тематике данного диссертационного исследования, публикуемых в настоящее время разными научными группами в высоко рейтинговых журналах. В работе предложены новые методы исследования лазерных сред и на основе этих методов выполнены измерения ряда новых материалов. Отдельной строкой можно выделить исследования по диагностике и подавлению эффекта нелинейного дополнительного тепловыделения. Исследования в области оптимизации геометрии дисковых и композитных дисковых активных элементов позволили разработать дисковый лазерный квантрон, по своим характеристикам соответствующий мировому уровню, а также раскрыли особенности термонаведенных фазовых искажений в дисковых и композитных дисковых активных элементах и методы их подавления. В частности, предложен, разработан и изготовлен новый тип композитных дисковых элементов из разнородных материалов (Yb:YAG/sapphire). На основе выполненных исследований разработан дисковый лазер кВт уровня средней мощности, предложена и реализована оригинальная схема неустойчивого резонатора для повышения оптического качества генерируемого лазерного излучения.

### **Практическая ценность диссертации**

Выполненные исследования позволили оптимизировать метод роста кристаллов по технологии Багдасарова и значительно повысить их лазерные характеристики. Разработанный в рамках работы новый вид композитных дисковых активных элементов из Yb:YAG/sapphire имеет значительные перспективы использования в высокоэнергетических дисковых лазерных усилителях.

Разработанный на основе отечественных технологий дисковый лазер киловаттного уровня мощности, являясь альтернативой зарубежным лазерным системам, может найти широкое применение в области технологической обработки материалов.

По результатам работы получено два патента РФ [10А, 11А].

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Величина нелинейного тепловыделения в легированной иттербием лазерной среде может быть определена новым методом, основанным на измерении динамики её нагрева калиброванной инфракрасной камерой при облучении на длине волны перехода (например, 1030 нм для Yb:YAG) с последующим расчётом величины источников тепловыделения. В кристалле Yb:YAG нелинейное тепловыделение может быть уменьшено снижением интенсивности усиленной спонтанной люминесценции (например, применением композитной структуры активного элемента).

2. Измерение времени жизни и спектра сечения усиления в иттербиевой среде можно проводить с одним образцом. Ошибку, связанную с захватом излучения можно исключить, закрывая образец диафрагмами разного диаметра, при постоянном диаметре накачки. Для расчёта истинного сечения усиления нормировку спектров люминесценции, полученных при разных диафрагмах, можно проводить во всём диапазоне длин волн.

3. Оптимизация толщины, легирования дискового активного элемента из Yb:YAG, его монтаж на алмазный теплоотвод, и многопроходная накачка позволяют получить высокоэффективную генерацию излучения (КПД~50%) со средней мощностью 1 кВт с возможностью масштабирования в мультиткиловаттный диапазон.

4. Термомодифузионная сварка композитных активных элементов из Yb:YAG и сапфира обеспечивает непрерывную лазерную генерацию с эффективностью выше, чем в аналогичных композитных элементах Yb:YAG/YAG и с меньшей величиной термонаведённых фазовых искажений благодаря меньшему уровню потерь, низкому уровню «холодных» поляризационных и фазовых искажений и большей теплопроводности нелегированной части.

5. Применение многопроходной схемы усиления в комбинации с дисковым активным элементом обеспечивает лазерную генерацию в неустойчивом кольцевом резонаторе с высоким качеством пучка. С точки зрения чувствительности к расстройкам, неустойчивый резонатор становится предпочтительнее устойчивого при масштабировании апертуры активного элемента с сохранением качества пучка.

### **Апробация работы**

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведённых автором в Институте прикладной физики Российской академии на-

ук в 2015–2019 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах отдела 350 и отделения Нелинейной динамики и оптики, а также на следующих областных, всероссийских и международных конференциях и научных школах: 17-я научная школа «Нелинейные волны», Нижегородская область, 2016; 17-я международная конференция «Оптика лазеров», С.-Петербург, 2016; 22-я Нижегородская сессия молодых учёных, 2017; Conference on Lasers and Electro-Optics PacificRim, Singapore, 2017, HongKong, China, 2018; Advanced Solid-State Lasers, Conference and Exhibition, Boston, Massachusetts, USA, 2016; EUROPHOTON, Vienna, Austria, 2016; CLEO-Europe 2019, Munich, Germany, 2019; Laser Congress (ASSL, LAC, LS&C), Vienna, Austria, 2019.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 статьях в рецензируемых журналах.

### **Личный вклад**

Основные результаты диссертационной работы были получены автором лично или при его непосредственном участии совместно с И.И. Кузнецовым, И.Б. Мухиным, О.В. Палашовым, И.Л. Снетковым, и Е.А. Перевезенцевым. Автором лично была построена численная модель для расчёта тепловых эффектов в дисковом лазере, с помощью которой сделан ряд расчётов, результаты которых впоследствии вошли в диссертацию. Экспериментальное измерение указанных тепловых эффектов в лазере также было сделано автором персонально. Измерение коэффициентов тепловыделения, времён жизни и спектров люминесценции в лазерных средах было выполнено непосредственно автором. Схема неустойчивого лазерного резонатора появилась в ходе длительной экспериментальной работы автора.

Автор считает своим долгом выразить благодарность своим коллегам за плодотворную совместную работу.

### **Структура и объем диссертации**

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, приложений и списка цитируемой литературы, включающего и работы автора. Общий объём работы составляет 117 страниц, включая 45 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 87 источников.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлены наиболее значимые научные и практические результаты, достигнутые мировыми лидерами в области дисковых лазеров [1]. Приведены основные принципы, на которых построена данная идея, указаны её ключевые особенности, способы масштабирования, а также основные причины, по которым оно затруднено. Так, глубокое охлаждение активной

среды требует криогенного и вакуумного оборудования, что увеличивает сложность конструкции. Масштабирование за счёт увеличения размеров активной среды ограничено эффектом УСИ [3]. Применение композитной структуры активного диска оправдано только при наличии отработанной технологии для его изготовления.

**В первой главе** выполнено исследование свойств лазерных сред, применяемых при конструировании лазеров, а именно – эффективность генерации, выделение тепла в условиях работы лазера, потери излучения, время жизни и спектр люминесценции. Основные результаты представлены в работах 2А, 4А-8А, 12А, 13А, 15А-18А, 21А, 22А. Особое внимание уделено исследованиям эффекта нелинейного тепловыделения. Данный эффект заключается в том, что при накачке лазерной среды, кроме дефекта кванта (стоксовых потерь) появляется ещё один механизм нагрева, который может нелинейно зависеть от мощности накачки [2, 5].

*В первом разделе первой главы* предложен новый метод [6] диагностики лазерных сред с иттербием на наличие источников тепла, связанных с безызлучательным распадом возбуждённого состояния иона  $\text{Yb}^{3+}$ . Данный метод основан на хорошо известном калориметрическом подходе измерения, где воздействие излучением на исследуемый образец приводит к изменению его температуры за счёт поглощения, а по изменению температуры нетрудно вычислить линейное поглощение в среде. Однако, воздействие осуществляется излучением на двух разных длинах волн. Облучение с использованием резонансной длины волны с минимальным «дефектом кванта» (например, 1030 нм) приводит к небольшому охлаждению лазерной среды в отсутствие дополнительных источников нагрева. Нагрев среды при просвечивании образца излучением на данной длине волны свидетельствует о наличии нежелательных механизмов потерь излучения, связанных с безызлучательным распадом возбуждения. Исследование образца на нерезонансной длине волны (1070 нм) позволяет измерить потери, обусловленные решёткой среды, не связанные с ионом  $\text{Yb}^{3+}$ . Такие измерения позволяют полностью разделить составляющие тепловыделения, вызванные нерезонансным поглощением, нелинейным тепловыделением и «дефектом кванта» (стоксовыми потерями). В таблице 1 представлены некоторые результаты, полученные с использованием описанного метода в кристаллах различных методов роста. Обнаруженное таким образом наличие сильного эффекта нелинейного тепловыделения в некоторых образцах полностью подтверждается значительным ростом температуры и падением эффективности при генерации в дисковых активных элементах. Кристаллы, выращенные по методу Чохральского, демонстрируют высокий дифференциальный КПД лазерной генерации (50–60%) вплоть до легирования в 10%, в то время как в кристаллах, выращенных методом Багдасарова, дифференциальный КПД не превышает 43%. При этом, последние демонстрируют повышенный нагрев в условиях работы лазера, не соответствующий численным оценкам, в то время как температура кристаллов Чох-



рального соответствует расчётным величинам при условии лазерной генерации, см рис. 1. В отдельном эксперименте было обнаружено, что при повышении температуры окружающей среды, тепловыделение в кристалле Yb:YAG (образец №19, таблица 1) на длине волны 1030 нм растёт (увеличение в 1.5 раза при нагреве от 20 до 120 °С). Описанный выше метод диагностики был применён для исследования ряда других сред, отличных от Yb:YAG. В некоторых из них наблюдалось охлаждение при облучении на длине волны 1030 нм.

Во втором разделе первой главы рассмотрены способы снижения эффекта дополнительного тепловыделения в кристаллах Yb:YAG. Сравнение кристаллов Yb:YAG, выращенных разными методами, показало, что метод роста Чохральского обеспечивает высокое качество материала (отсутствие нагрева на 1030 нм) при легировании от 0 до 8%, в то время как кристаллы, выращенные методом Багдасарова [7], демонстрируют наличие источников тепла, связанных с безызлучательным распадом возбуждённых состояний, что, возможно, связано с наличием ионов молибдена (обычно в методе роста Багдасарова применяется молибденовый тигель).

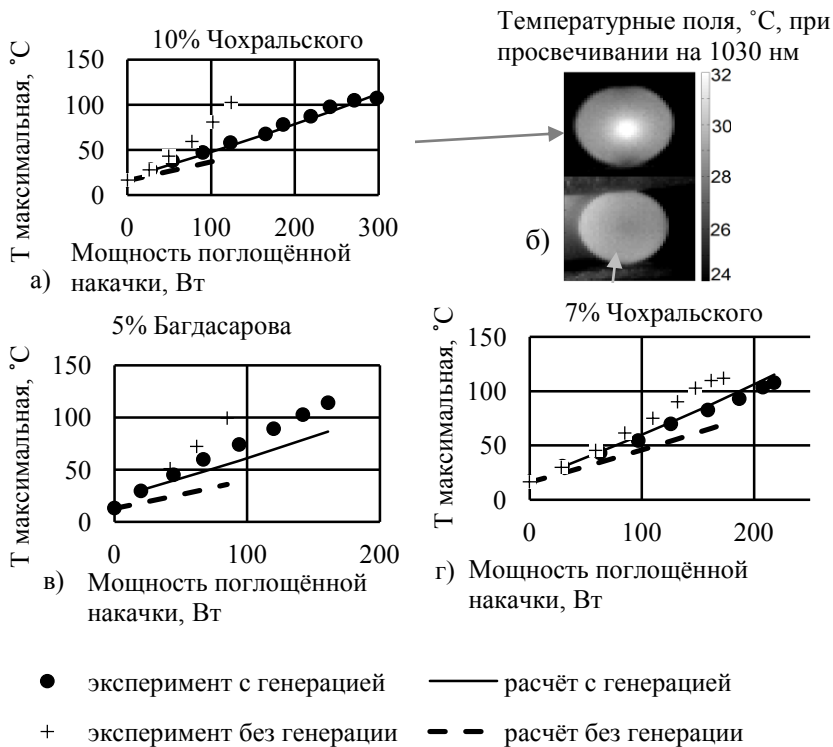
Таблица 1. Коэффициенты тепловыделения в кристаллах Yb:YAG, на длинах волн 1030 и 1070 нм

Метод Багдасарова

		Коэффициент тепловыделения, I/м		Номер образца
		1030 нм	1070 нм	
		Концентрация иттербия, ат. %		
	2	0.14	0.15	1
	5	1.4	0.072	2
	7	4.5	0.069	3
	7	6.3	0.14	4
	7	8.7	0.15	5
	7	6.8	0.061	6
	7	7.9	0.062	7
	8	7.3	0.072	8
	8	6.5	0.11	9
	10	10.6	0.29	10

Метод Чохральского

		Коэффициент тепловыделения, I/м		Номер образца
		1030 нм	1070 нм	
		Концентрация иттербия, ат. %		
	3	-0.1	0.024	11
	3	-0.02	0.13	12
	5.5	-0.3	0.01	13
	7	-0.5	0.001	14
	7	-0.083	0.041	15
	7	-0.1	0.011	16
	8	-0.2	0.0028	17
	8	-0.27	0.005	18
	10	17	0.24	19
	16	43	12	20



**Рис. 1.** Расчётные и измеренные температуры АЭ в экспериментальной лазерной установке (а, в, г), б – температурные поля в 10% и 7% образцах Yb:YAG при просвечивании на 1030 нм

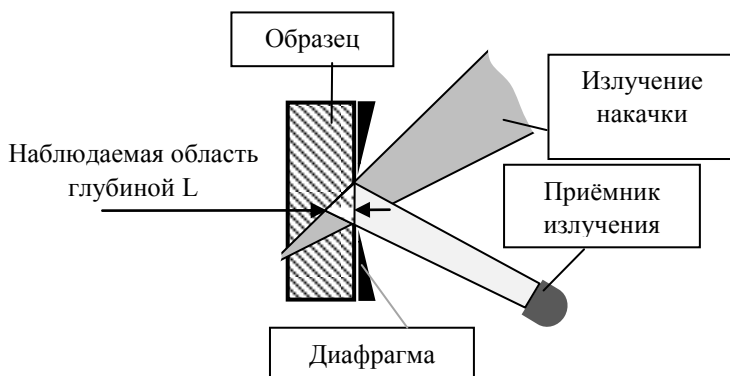
Различие в качестве кристаллов, выращенных разными методами, проявляется также и при использовании их в качестве активной среды экспериментального дискового лазера (рис. 1). Для улучшения метода роста Багдасарова предложено использовать тигли с вольфрамовым покрытием. Такой подход позволил значительно повысить качество выращиваемых кристаллов. Величина дополнительного тепловыделения в кристаллах из «вольфрамового» тигля уменьшилась по сравнению с кристаллами из молибденового тигля, а дифференциальный КПД вырос с 43% до 55%, что близко к лучшим кристаллам, выращенным методом Чохральского.

Существует концепция так называемого композитного активного элемента, в котором слой легированной среды скреплён со слоем нелегированной, имеющей близкий показатель преломления. Благодаря этому отсутствует эффект полного внутреннего отражения на границе легированного слоя, и его

люминесценция свободно покидает активную область, не усиливаясь. Из-за снижения эффекта усиленного спонтанного излучения, возрастает инверсия в среде, и, как следствие, усиление слабого сигнала, что является преимуществом композитного элемента. Однако, при высокой инверсии в сильнолегированной среде проявляется эффект нелинейного дополнительного тепловыделения (рис. 1, а, график «эксперимент без генерации»). В связи с этим возникает вопрос, какой тип элемента больше подвержен данному негативному эффекту. Непосредственное сравнение простого и композитного элемента по одному термонаведённому эффекту (температура, фаза, деполяризация) невозможно, поскольку элементы имеют разную геометрию. Сравнение было проведено с одновременным привлечением экспериментальной установки для измерения температуры и фазовых искажений в активном элементе, а также численной модели расчёта данных величин, на основе уравнения теплопроводности с заданными источниками, и уравнения упругости. Распределение источников тепла в модели было задано согласно эксперименту. Их абсолютная величина выбиралась таким образом, чтобы расчётные величины совпадали с измеренными. Полученная таким образом мощность источников тепла позволяет судить о величине эффекта дополнительного тепловыделения в простом и в композитном дисковых активных элементах. Такая процедура сравнения была проделана для двух разных диаметров пятна накачки. Было обнаружено, что активный элемент с композитной структурой меньше подвержен эффекту нелинейного дополнительного тепловыделения. Данный результат можно объяснить уменьшением интенсивности усиленного спонтанного излучения. Излучение люминесценции поглощается на свободных электронах и ионах  $\text{Yb}^{2+}$ , и даёт вклад в нагрев активного элемента. Таким образом, наличие нелегированного слоя в композитном дисковом АЭ приводит к снижению величины дополнительных источников нагрева как за счёт меньшей температуры легированной части, так и, возможно, за счёт меньшей интенсивности УСИ.

*В третьем разделе первой главы* рассмотрена проблема корректного измерения времени жизни и сечения усиления в иттербиевых средах. Проблема обусловлена эффектом захвата излучения, который приводит к ошибке в измерении этих величин. Существуют методы измерения [8, 9], которые позволяют устранить данную ошибку. Данные методы основаны на том, что ошибка, внесённая эффектом захвата, стремится к нулю при уменьшении размеров области среды, в которой регистрируется излучение. Можно измерить время жизни и спектр люминесценции в зависимости от размера излучающей области, получить соответствующую функцию, и экстраполировать её на нулевой размер, получив истинные значения интересующих величин. В оригинальных работах [8, 9] регулировка размеров наблюдаемой области выполняется путём изменения диаметра диафрагмы и пучка накачки (рис. 2). В настоящей работе показано, что достаточно изменять только диаметр диафрагмы, положив диаметр накачки постоянным, равным наименьшему диаметру

используемых диафрагм. При регистрации спектров люминесценции, их амплитуда зависит от диаметра диафрагмы, и для правильной экстраполяции на нулевой диаметр, необходима нормировка. В исходных работах нормировка производится таким образом, чтобы достигалось совпадение спектров люминесценции в длинноволновой области. Такой выбор обусловлен тем, что влияние эффекта захвата снижается при увеличении длины волны.

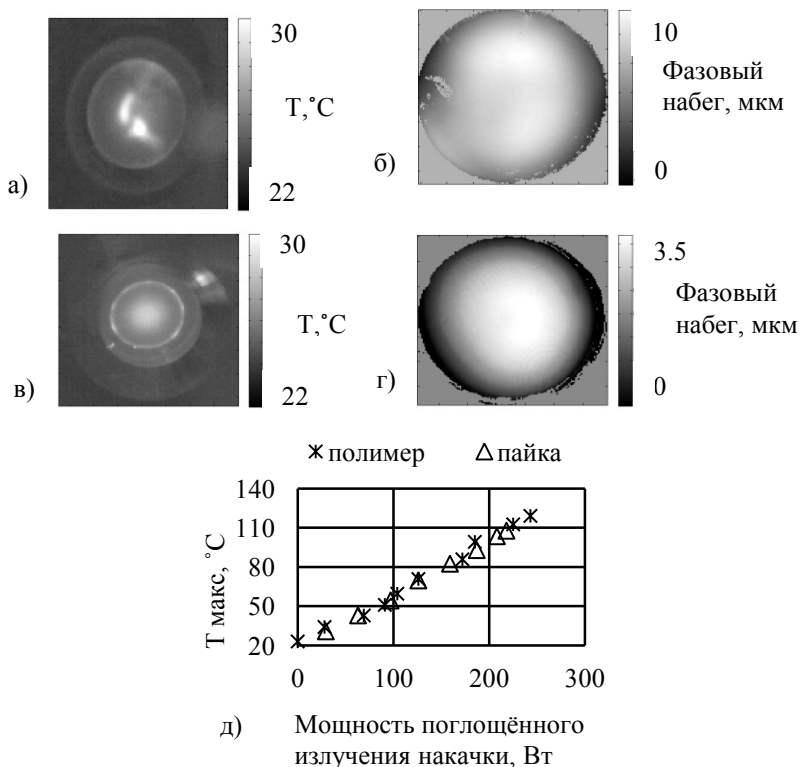


**Рис. 2.** Схема измерения спектра и времени релаксации люминесценции

Тем не менее, даже в длинноволновой области эффект захвата присутствует. В связи с этим, в настоящей работе нормировка производится во всём диапазоне длин волн. Данный метод измерений с изложенными модификациями был использован для получения времени жизни и спектра сечения усиления в ряде иттербиевых сред.

**Вторая глава** посвящена поискам способов снижения термонаведённых эффектов в дисковых активных элементах. Основные результаты главы представлены в работах 1А, 9А, 14А, 16А, 17А, 20А-23А. Выполнено сравнение фазовых искажений в тонкодисковом активном элементе и композитном дисковом активном элементе, а также предложено существенное улучшение композитных дисковых активных элементов применением нелегированной части из более высокотеплопроводного материала.

*В первом разделе второй главы* исследованы разные способы крепежа дисковых активных элементов в квантрон. В связи с малой толщиной элемента (200 мкм), а также высокой плотностью потока тепла через его поверхность ( $500 \text{ Вт/см}^2$ ), традиционные способы охлаждения (напрямую потоком жидкости, газа или через слой теплопроводящего состава) для настоящей задачи не годятся. Найден способ монтажа на высокотеплопроводный (алмазный) радиатор при помощи индиевого припоя в восстанавливающей атмосфере.



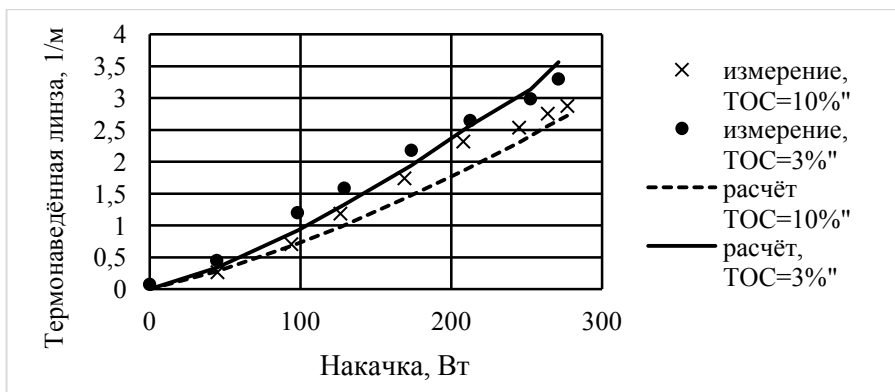
**Рис. 3.** Распределение температуры и фазы в тонкодисковом активном элементе, смонтированном на радиатор при помощи индиевого припоя (а, б); в, г – распределение температуры и фазы в элементе, смонтированном при помощи клея; д – зависимость температуры элемента от накачки

Недостатком данного способа является неоднородность теплового контакта из-за окисления припоя, а также температурное влияние в процессе пайки, приводящее к изгибу зеркальной поверхности, и, как следствие, к фазовым искажениям излучения (рис. 3, а, б). Освоен другой способ монтажа, при помощи фотоотверждаемого полимерного клея. Данный способ позволяет контролировать фазовый профиль активного элемента (рис. 3, г), причём тепловой контакт между ним и радиатором всегда однородный (рис. 3, в) и не хуже, чем при пайке индием (тепловое сопротивление  $0.05 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{Вт}$ ) (рис. 3, д).

В свою очередь, алмазный радиатор (имеющий теплопроводность  $1300 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$ ), охлаждается водой с регулируемой температурой и расходом. Были измерены дифференциальный КПД непрерывной лазерной генерации и

максимальная температура активного элемента в зависимости от этих двух параметров.

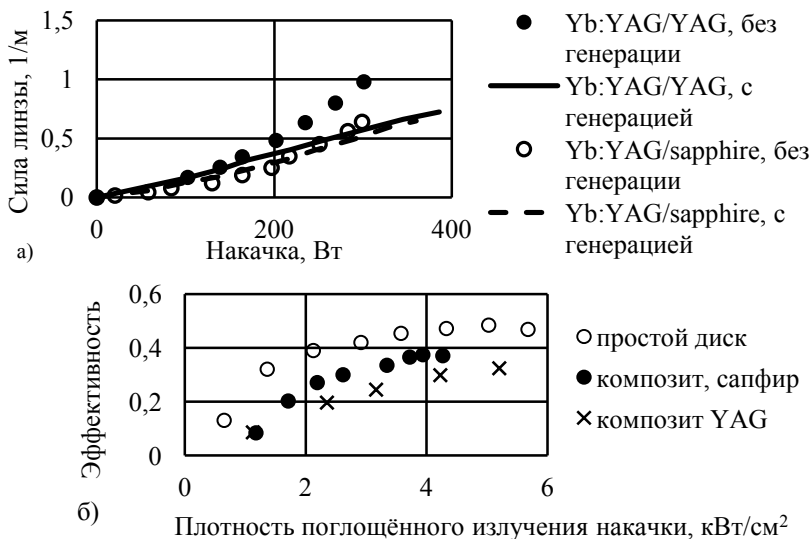
Во втором разделе второй главы выполнено экспериментальное и теоретическое сравнение фазовых искажений излучения в простом (Yb:YAG) и в композитном (Yb:YAG/YAG) активном элементе. Было обнаружено, что нелегированный слой в композитном элементе вносит основной вклад в искажения, а термонаведённая линза в 15 раз больше, чем в простом дисковом элементе. Данное отличие связано с одним из важных преимуществ композитной структуры активного элемента – отводом тепла через нелегированную часть. Это, с другой стороны, приводит к значительным температурным градиентам в нелегированной части и, как следствие, росту фазовых искажений. Кроме того, к росту фазовых искажений приводит остаточное нерезонансное поглощение лазерного излучения нелегированным слоем, что подтверждается экспериментами с непрерывной лазерной генерацией с разными коэффициентами пропускания выходного зеркала, рис. 4.



**Рис. 4.** Измеренная и рассчитанная сила термонаведённой линзы в композитном элементе Yb:YAG/YAG при условии лазерной генерации с разным пропусканием выходного зеркала

В третьем разделе второй главы предложена идея композитного активного элемента из разнородных материалов Yb:YAG/sapphire. В таком элементе, благодаря более высокой теплопроводности сапфира (30 Вт/м\*К у сапфира против 11 Вт/м\*К у граната) снижены температурные градиенты, что означает более слабые термонаведённые фазовые искажения. Такие композитные элементы были изготовлены методом термодиффузионной сварки [10]. В них была измерена эффективность лазерной генерации, усиление слабого сигнала, и фазовые искажения. По сравнению с «обычным» композитным элементом Yb:YAG/YAG сила термонаведённой линзы в новых элементах оказалась ниже (рис. 5, а), а эффективность генерации – выше (рис. 5, б). Усиление слабо-

го сигнала достигло 30%, что значительно выше, чем в простом дисковом элементе, и сравнимо с «обычным» композитным.

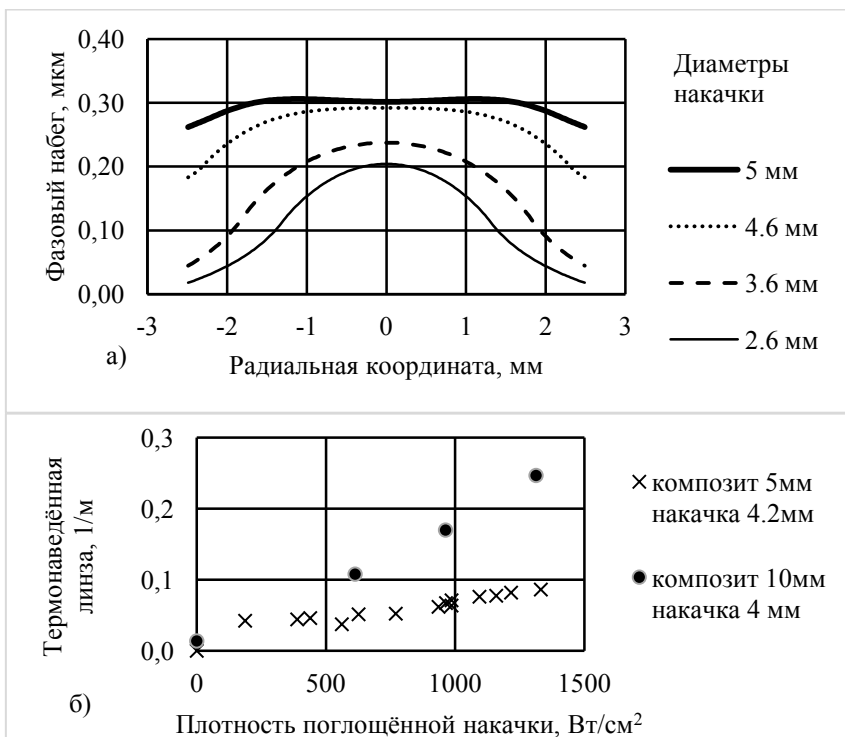


**Рис. 5.** Экспериментально измеренная сила термонаведённой линзы в разных композитных активных элементах в зависимости от мощности накачки (а); б – эффективность лазерной генерации

Предложен и экспериментально продемонстрирован ещё один способ снижения фазовых искажений, путём правильного подбора диаметров активного элемента и пятна накачки. Численный расчёт показывает, что при приближении диаметра пятна накачки к диаметру композитного элемента, фазовый профиль стремится к более «плоскому» (рис. 6а). Для экспериментальной проверки, был изготовлен композитный активный элемент диаметром 5 мм. В нём были измерены фазовые искажения и усиление при диаметре пятна накачки 4.2 мм. Термонаведённая линза оказалась в 3 раза меньше, чем в аналогичном композите диаметром 10 мм, при том же диаметре накачки (рис. 6, б). Усиление слабого сигнала достигло 30%, как и в элементах большего диаметра.

**Третья глава** посвящена разработке дисковых лазеров и повышению их средней мощности и яркости. Повышение возможно путём применения нескольких активных элементов, увеличения их апертуры, а также правильным подбором их ключевых параметров (толщина и легирование). Основные результаты главы представлены в работах 1А, 3А, 5А, 19А.

*В первом разделе первой главы* представлены результаты разработки дискового лазерного квантрона. На основе представленных в первой главе результатов измерений материальных характеристик, выполнен расчёт оптимальных параметров дискового активного элемента.

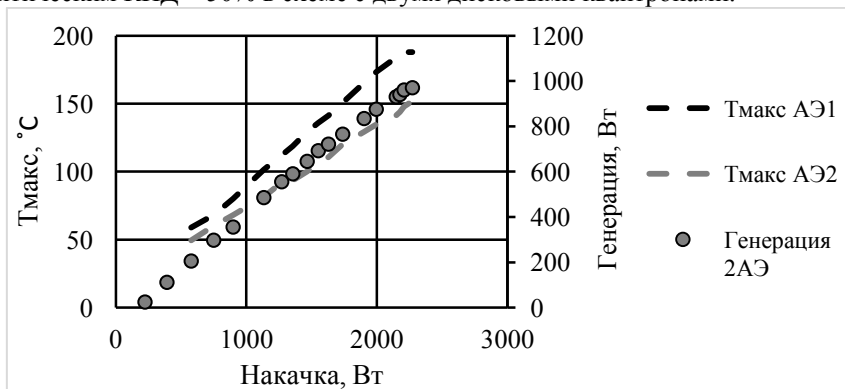


**Рис. 6.** Расчётные фазовые профили в композитном элементе Yb:YAG/sapphire диаметром 5 мм при разных диаметрах пятна накачки (а); б – силы термонаведённых линз в двух композитных элементах разного диаметра при одном диаметре накачки

Показано, что оптимальное легирование активного элемента, при котором ещё не проявляется эффект дополнительного тепловыделения, составляет 7%. Был проведён расчёт необходимой толщины элемента, с точки зрения поглощения накачки, усиления сигнала, и эффективности охлаждения. Расчёт показал, что для увеличения мощности непрерывной лазерной генерации следует уменьшать толщину элемента, с увеличением числа проходов накачки. Ограничивающим фактором является эффект УСИ, а при доступном числе проходов накачки необходимая толщина элемента составляет 200 мкм. Дисковые активные элементы с легированием 7%, толщиной 200 мкм были изготовлены и смонтированы на радиатор при помощи полимерного клея (метод монтажа описан во второй главе). С такими элементами получена лазерная генерация эффективностью 50%, мощностью 600 Вт, ограниченной мощностью накачки (1200 Вт). Предложена схема лазера на основе двух дисковых квантронов. В данной схеме применён многомодовый резонатор, осуществляющий пере-



нос изображения лазерной моды между двумя активными дисками. Такой подход позволяет масштабировать мощность путём добавления большого количества идентичных дисковых квантронов в общий резонатор. В настоящей схеме продемонстрирована лазерная генерация мощностью 1 кВт (рис. 7) и оптическим КПД  $\sim 50\%$  в схеме с двумя дисковыми квантронами.



**Рис. 7.** Зависимость мощности лазерной генерации от суммарной мощности накачки в лазерном резонаторе с двумя дисковыми квантронами

Во втором разделе третьей главы изложена проблема, связанная с масштабированием мощности одномодового дискового лазера. Разработанный лазерный резонатор кВт уровня может быть настроен и для излучения одной поперечной моды, но, при увеличении активной апертуры для сохранения постоянного качества пучка (величины  $M^2$ [11]) должен расти размер низшей моды. Последний определяется параметрами резонатора, причём чувствительность устойчивого резонатора к расстройкам неизбежно растёт с ростом размера моды. Это ограничивает применение устойчивого резонатора при масштабировании дисковых лазеров с высокой яркостью излучения. Для повышения яркости разработанного кВт лазера предложена оригинальная схема (рис. 8) неустойчивого кольцевого лазерного резонатора, способного работать при малом усилении в дисковом активном элементе, благодаря применению многопроходной геометрии. В таком резонаторе размер моды определяется отражающей диафрагмой, которая одновременно служит для вывода излучения из резонатора. В связи с этим чувствительность такого резонатора к расстройкам не зависит от размера основной моды. Данное свойство является преимуществом такой схемы перед устойчивыми резонаторами при увеличении мощности одномодового дискового лазера за счёт диаметра активного элемента. В предложенной схеме получена лазерная генерация в квазинепрерывном режиме [12]. При коэффициенте увеличения резонатора 1.3 дифференциальная эффективность равна 29%, качество выходного пучка  $M^2 = 4.5$ .

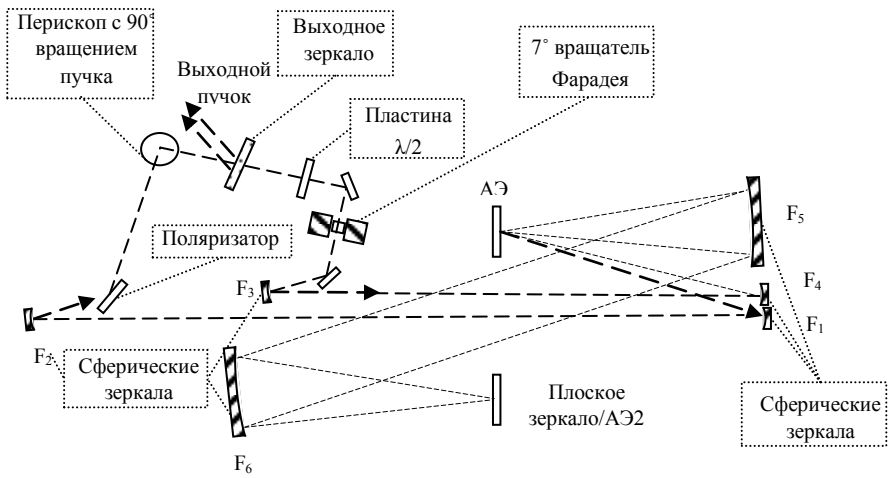


Рис. 8. Схема неустойчивого кольцевого резонатора. Фокусные расстояния зеркал:  $F_1 = 80-100$  см,  $F_2 = 80-200$  см,  $F_3 = 60$  см,  $F_4 = F_5 = F_6 = 80$  см

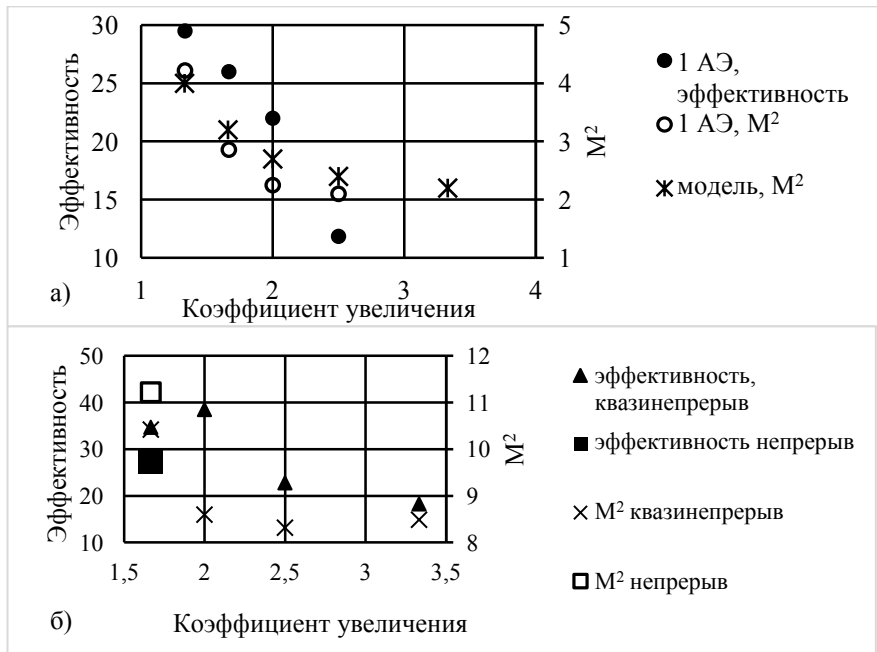


Рис. 9. Дифференциальная эффективность и качество пучка неустойчивого резонатора в зависимости от коэффициента увеличения: а) – с одним АЭ, б) – с двумя АЭ

При коэффициенте увеличения 2.5 эффективность снижается до 12%, качество пучка улучшается,  $M^2 = 2.1$ , рис. 9, а. С использованием двух квантронов была получена лазерная генерация в непрерывном режиме, однако из-за фазовых искажений во втором активном элементе ухудшилось качество выходного пучка рис. 9, б.

**В заключении** диссертации перечислены основные результаты, указана практическая значимость выполненной работы

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен метод диагностики лазерных сред, легированных иттербием, на предмет величины нелинейного тепловыделения. Метод основан на измерении нагрева образца при его освещении пучком излучения на резонансной и нерезонансной длинах волн. Экспериментально продемонстрирована корреляция между величиной нелинейного тепловыделения, измеренной предложенным методом и нагревом дисковых активных элементов в условиях наличия и отсутствия лазерной генерации.

2. Показано, что эффективность генерации в кристаллах Yb:YAG, выращенных методом Багдасарова, ниже, чем в кристаллах, выращенных методом Чохральского, при этом первые содержат больше посторонних примесей. Предложен способ по улучшению метода Багдасарова. Продemonстрировано значительное увеличение эффективности генерации излучения в кристаллах, выращенных улучшенным методом.

3. Исследован эффект нелинейного дополнительного тепловыделения в различных лазерных средах (Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:LuAG, ...), различных производителей и различного легирования, а также в зависимости от температуры и геометрии активного элемента. Показано, что данный эффект зависит от величины легирования и величины примесей в материалах; снижение температуры, и/или интенсивности УСИ в композитном АЭ приводит к уменьшению данного эффекта.

4. Предложена модификация метода измерения сечения усиления и времени жизни в легированных иттербием активных средах. Показано, что данные методы позволяют избежать ошибки, внесённой перепоглощением излучения, что даёт возможность диагностики активных элементов с иттербием. С помощью модифицированного метода исследованы спектры сечения усиления и время жизни в ряде лазерных сред (Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:LuAG, Yb:CaF<sub>2</sub>, Yb:Glass, ...).

5. Исследовано влияние охлаждения дисковых активных элементов (в частности, способов их монтажа) на эффективность лазерной генерации и возникающие фазовые искажения. Показано, что наилучшим способом монтажа является приклейка дискового активного элемента на высокотеплопроводный диэлектрический радиатор. Продemonстрирована непрерывная лазерная генерация с оптической эффективностью более 50%.

6. Выполнено экспериментальное и теоретическое сравнение тепловых эффектов и усиления в дисковом Yb:YAG и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активных элементах. Показано, что композитная структура активного элемента позволяет значительно улучшить эффективность охлаждения инверсной области, а также подавить такие эффекты как УСИ и нелинейное дополнительное тепловыделение. Однако, увеличение толщины активного элемента за счёт нелегированной части приводит к дополнительным фазовым искажениям излучения («тепловой линзе»), в частности из-за наличия решёточного поглощения в YAG.

7. Разработан новый тип композитных дисковых активных элементов из разнородных материалов Yb:YAG/sapphire. Изготовлены такие активные элементы методом термодиффузионной сварки. На изготовленных активных элементах продемонстрирована высокоэффективная лазерная генерация, измерена величина усиления, поляризационных и фазовых искажений излучения. Показано, что в таком типе композитных активных элементов можно обеспечить увеличенное (по сравнению с Yb:YAG/YAG) усиление и уменьшенную величину фазовых искажений за счёт более высокой теплопроводности сапфира.

8. Экспериментально и теоретически продемонстрировано, что величина фазовых искажений в композитном дисковом активном элементе может быть уменьшена путём наиболее оптимального подбора геометрии охлаждения его задней и боковой поверхностей.

9. Экспериментально и теоретически исследовано влияние толщины и легирования дискового активного элемента на эффективность лазерной генерации. Показано, что уменьшение толщины диска с одновременным увеличением числа проходов накачки через активный элемент позволяет увеличить эффективность непрерывной лазерной генерации. При этом минимальная толщина диска (~ 150 мкм) ограничена эффектом УСИ

10. На основе разработанных дисковых лазерных квантронов создан двухквантронный непрерывный дисковый лазер с выходной мощностью до 1 кВт и эффективностью лазерной генерации ~ 50%, работающий в режиме многомодовой генерации поперечных мод.

11. Разработана новая схема неустойчивого кольцевого резонатора для дискового активного элемента с многопроходной геометрией распространения излучения, обеспечивающая качество лазерного излучения близкое к дифракционному при большом диаметре пучка накачки на активном элементе (что характерно для дисковых лазеров с мульти-кВт средней мощностью). Экспериментально показана работоспособность данной схемы, получен лазерный пучок хорошего качества, в том числе, и в непрерывном режиме работы лазера.

## Цитируемая литература

- [1] *Kuhn, V.* Latest advances in high brightness disk lasers / V. Kuhn, T. Gottwald, C. Stolzenburg, S.-S. Schad, A. Killi, T. Ryba // *Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices* – 2015. .
- [2] *Larionov, M.* Nonlinear Decay of the Excited State in Yb:YAG / M. Larionov, K. Schuhmann, J. Speiser, C. Stolzenburg, A. Giesen // *Advanced Solid-State Photonics*, – 2005. - P. TuB49.
- [3] *Kouznetsov, D.* Surface loss limit of the power scaling of a thin-disk laser / D. Kouznetsov, J.-F. Bisson, J. Dong, K.-i. Ueda // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2006. – Vol. 23, №6. – P. 1074–1082.
- [4] *Speiser, J.* Thin Disk Laser – Energy Scaling // *Laser Physics*. – 2009. – Vol. 19, №2. – P.274–280.
- [5] *Wolters, U.* Thermal Effects and Inversion Density in Yb:YAG Thin-Disk Lasers - Examination of Nonlinear Losses in Single Crystals and Ceramics / U. Wolters, K. Beil, C. Kränkel, K. Petermann, G. Huber, P. Moulton // *Advanced Solid-State Lasers Congress, OSA Technical Digest (online)*. – 2013. – AW1A.3.
- [6] *Volkov, M. R.* A New Method of Diagnostics of the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media / M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 54, №1. – P. 1–6.
- [7] *Arzakantsyan, M.* Growth of large 90 mm diameter Yb:YAG single crystals with Bagdasarov method / M. Arzakantsyan, N. Ananyan, V. Gevorgyan, J. C. Chanteloup // *Optical Materials Express*. – 2012. – Vol. 2, №9. – P.1219–1225.
- [8] *Kühn, H.* Model for the calculation of radiation trapping and description of the pinhole method / H. Kühn, S. T. Fredrich-Thornton, C. Kränkel, R. Peters, K. Petermann // *Optics Letters*. – 2007. – Vol.32, №13. – P. 1908–1910.
- [9] *Kühn, H.* Correction of reabsorption artifacts in fluorescence spectra by the pinhole method / H. Kühn, K. Petermann, G. Huber // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 35, №10. – P. 1524–1526.
- [10] *Mukhin, I. B.* Fabrication of composite laser elements by a new thermal diffusion bonding method / I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, O. V. Palashov // *Optical Materials Express*. – 2014. – Vol. 4, №2. – P. 266–271.
- [11] *Siegman, A. E.* New developments in laser resonators // *OE/LASE '90*, 1990. 13.
- [12] *Volkov, M. R.* Thin-disk laser with multipass unstable ring resonator / M. R. Volkov, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov // *Journal of the Optical Society of America B*. – 2019. – Vol. 36, №5. – P. 1370–1375.

### Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

- 1А. *Волков, М. Р.* Дисковые квантроны на основе Yb:YAG для лазеров мультикиловаттной средней мощности / М. Р. Волков, И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, О. В. Палашов // *Квантовая электроника*. – 2019 – т. 49, №4 – с. 354–357.

- 2A. Волков, М. Р. Тонкостержневые активные элементы для усиления фемтосекундных импульсов / М. Р. Волков, И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, О. В. Палашов, А. В. Конященко, С. Ю. Теняков, Р.А. Ливенцов // Квантовая электроника. – 2019 – т. 49, №4 – с. 350-353.
- 3A. Volkov, M. R. Thin-disk laser with multipass unstable ring resonator / M. R. Volkov, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov // Journal of the Optical Society of America B. – 2019 – vol. 36, №5 – pp. 1370-1375.
- 4A. Mironov, E. A. Thermo-optical properties of EuF<sub>2</sub>-based crystals / E. A. Mironov, M. R. Volkov, O. V. Palashov, D. N. Karimov, E. V. Khaydukov, I. A. Ivanov // APPLIED PHYSICS LETTERS. – 2019. – vol. 114, №7 – p. 073506.
- 5A. Volkov, M. R. A New Method of Diagnostics of the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media / M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin // IEEE Journal of Quantum Electronics – 2018 – vol. 54, №1 – pp. 1-6.
- 6A. Snetkov, I. L. Laser generation on Yb:LuAG ceramics produced by nanocrystalline pressure-less sintering in H<sub>2</sub> / Snetkov I. L., Ding Z., Yakovlev A. I., Volkov M. R., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Ying S. and Ken-ichi U., // Laser Physics Letters. – 2018 – vol. 15 – p. 035801.
- 7A. Максимов, Р.Н. Спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики керамики на основе твердого раствора Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, активированного Yb<sup>3+</sup> / Р. Н. Максимов, В. А. Шитов, М. Р. Волков, О. Л. Вадимова, И. Л. Снетков // Квантовая электроника. – 2018 – т. 48 – №8 – с. 695-698.
- 8A. Perevezentsev, E. A. Multipass cryogenic Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic disk amplifier / E. A. Perevezentsev, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O.V. Palashov // Applied Physics B, vol. 125, 8, p.141
- 9A. Kuznetsov, I. Composite Yb:YAG/sapphire thin-disk active elements for high-energy high-average power lasers / I. Kuznetsov, A. Pestov, I. Mukhin, M. Volkov, M. Zorina, N. Chkhalo, O. Palashov // Optics Letters, vol. 45, 2, pp. 387-390.
- 10A. Лазер с модуляцией добротности резонатора и стабилизацией выходных импульсов: пат. 2689846 Рос. Федерация / М. Р. Волков, И. Б. Мухин, О. В. Палашов; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).
- 11A. Дискковый лазерный неустойчивый резонатор для обеспечения выходного лазерного сигнала с близким к дифракционному качеству пучка / М. Р. Волков, И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, О. В. Палашов (заявка АААА-Г19-619080690022-3).
- 12A. Волков, М. Р. Расчёт и измерение искажений лазерного излучения в дисковых лазерах // Нелинейные волны. – 2016 – Сб. тезисов, с. 42.

- 13A. *Volkov, M. R.* Thermal distortions and heat sources in disk laser active element / M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin // Laser Optics – 2016 – St. Petersburg, Russia – ThR1-28.
- 14A. *Volkov, M. R.* Impact of disk laser geometry on excess nonlinear heat release / M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin // CLEO Pacific Rim – 2018 – Hong Kong, China – Th2D.4.
- 15A. *Волков, М. Р.* Дисковые лазеры с активными элементами высокого легирования // XXII Нижегородская сессия молодых учёных – 2017 – сборник тезисов, с. 12-13.
- 16A. *Kuznetsov, I. I.* High average and high peak power MOPA laser based on Yb:YAG elements of different geometries / I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, M. R. Volkov, O. L. Vadimova, O. V. Palashov // ASSL – 2016 – Boston, Massachusetts, USA – JTU2A.27.
- 17A. *Kuznetsov, I. I.* Thermal behavior of composite Yb:YAG/YAG active element in high average power pulsed amplifier / I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O. L. Vadimova, E. A. Perevesentsev, O. V. Palashov, // EUROPHOTON – 2016 – Vienna, Austria – PO-2.35
- 18A. *Perevezentsev, E. A.* Hybrid Yb:YAG and Cryogenic Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Laser / E. A. Perevezentsev, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O. L. Vadimova, O. V. Palashov // Laser Congress (ASSL, LAC, LS&C) – 2019 – Vienna, Austria – JTh3A.19
- 19A. *Volkov, M. R.* Unstable ring resonator with multipass telescopic scheme for disk-shaped active elements / M. R. Volkov, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov // Laser Congress (ASSL, LAC, LS&C) – 2019 – Vienna, Austria – JTU3A.5
- 20A. *Kuznetsov, I. I.* Thermal effects in Yb:YAG/Sapphire composite active elements for thin-disk lasers / I. I. Kuznetsov, A. E. Pestov, I. B. Mukhin, M. V. Zorina, M. R. Volkov, O. V. Palashov, N. I. Chkhalo, // Laser Congress (ASSL, LAC, LS&C) – 2019 – Vienna, Austria – AW3A.3
- 21A. *Kuznetsov, I. I.* High average and peak power laser based on Yb:YAG amplifiers of advanced geometries for OPCPA pumping/ I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, M. R. Volkov, O. V. Palashov // CLEO Pacific Rim Conference 2018, Hong Kong, China, Tu3A.4
- 22A. *Kuznetsov, I. I.* High-Power Laser Based on Amplifiers with Yb:YAG Elements of Advanced Geometries / I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, M. R. Volkov, O. V. Palashov // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Singapore, s1231
- 23A. *Mukhin, I. B.* Thermally diffusion bonded Yb:YAG/Sapphire composite active elements for thin disk lasers / I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, M. R. Volkov // CLEO-Europe 2019, Munich, ca\_p\_39.

Волков Михаил Романович

**ПОДАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ  
В ИТТЕРБИЕВЫХ ДИСКОВЫХ ЛАЗЕРАХ  
КИЛОВАТТНОГО УРОВНЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 16.07.2020 г.  
Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,5.  
Тираж 100 экз. Заказ №31(2020).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН  
603950, г. Н. Новгород, ул. Ульянова, 46