

*На правах рукописи*

КУЗНЕЦОВ Иван Игоревич

**ЛАЗЕРЫ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ  
НА ОСНОВЕ YB:YAG ЭЛЕМЕНТОВ  
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГЕОМЕТРИЙ**

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 — 2016

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

Научный руководитель: Палашов Олег Валентинович, кандидат физико-математических наук, заведующий отделом, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук».

Официальные оппоненты: Венедиктов Владимир Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова;

Гречин Сергей Гаврилович, кандидат технических наук, Научно-исследовательский институт радиоэлектронной техники Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Защита состоится " " \_\_\_\_\_ 2016 г. в \_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д002.069.02 в Институте прикладной физики РАН (603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФРАН.  
Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ю.В. Чугунов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Предмет исследования и актуальность темы

В настоящее время импульсные и непрерывные лазеры с высокой средней мощностью не только активно используются в промышленности, медицине и телекоммуникациях, но и становятся уникальным инструментом для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований. На их основе создаются источники вторичного излучения рентгеновского [1], ультрафиолетового [2], среднего инфракрасного [3] и терагерцового [4] диапазонов. Такие источники компактны и обладают рекордно высокой средней яркостью, что открывает для них множество новых приложений. Лазеры, сочетающие высокую пиковую и среднюю мощность становятся все более востребованы в области лазерных ускорителей [5]. В космической отрасли существуют такие проекты, как создание лазерных двигателей [6] и удаление космического мусора с помощью наземных или космических лазерных систем [7]. В военной сфере активно разрабатывается лазерное оружие и лазерные системы наведения [8].

Одним из самых перспективных типов лазеров, позволяющих достигать высокую среднюю мощность, является твердотельный лазер на основе кристалла алюмо-иттриевого граната, легированного трехзарядными ионами иттербия  $\text{Yb}^{3+}$ , ( $\text{Yb}:\text{YAG}$ ) с диодной накачкой. Кристалл  $\text{Yb}:\text{YAG}$  обладает уникальными спектральными свойствами [9]. Он имеет очень простую схему энергетических уровней: два электронных уровня  ${}^2\text{F}_{5/2}$  и  ${}^2\text{F}_{7/2}$ , образованных спин-орбитальным взаимодействием, каждый из которых разделен на 4 и 3 подуровня соответственно за счет штарковского расщепления. В такой схеме отсутствуют эффекты ап-конверсии и кросс-релаксации, и возникает очень малый дефект кванта ( $\sim 9\%$ ), чему соответствует малое тепловыделение в среде. Кристалл обладает достаточно широкой полосой усиления, что позволяет усиливать импульсы сверхкороткой длительности ( $< 1$  пс), имеет довольно большое время жизни ( $\sim 1$  мс) и сечение усиления ( $\sim 2.1 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>), а также высокую теплопроводность ( $\sim 10$  Вт/м/К) [10].

Главной проблемой, возникающей при разработке твердотельных лазеров с высокой средней мощностью, является тепловыделение в активном элементе (АЭ). Нагрев АЭ приводит к вредным тепловым эффектам, таким как ухудшение его свойств, фазовые и поляризационные искажения излучения. Можно выделить ряд задач, которые необходимо решить при разработке лазеров высокой средней мощности. Важнейшей задачей является выбор геометрии АЭ. Для эффективного охлаждения он должен иметь малый размер по той координате, вдоль которой осуществляется охлаждение, и большую площадь охлаждаемой поверхности. Существует три таких геометрии: тонкий стержень, тонкий слэб и тонкий диск. Все геометрии сегодня активно используются в лазерах, и каждая занимает свою нишу в области выходных характеристик. Дру-

гой важной задачей является исследование тепловых параметров лазерной системы, определяющих распределение температуры в АЭ лазера: тепловыделение в АЭ, теплопроводность АЭ, теплоемкость АЭ (при импульсной накачке) и граничные условия, характеризуемые коэффициентами теплопередачи на контактах твердых тел и коэффициентами теплоотдачи на контактах между твердыми телами и хладагентом. Экспериментальное исследование этих параметров необходимо как для оптимизации системы охлаждения АЭ, так и для проведения адекватного расчета распределения температуры в системе. Еще одной важной задачей является теоретическое и экспериментальное исследование термонаведенных фазовых и поляризационных искажений излучения в АЭ, а также изучение их влияния на выходные характеристики лазера. Фазовые искажения излучения приводят к ухудшению качества выходного пучка и дифракционным потерям. Поляризационные искажения приводят к изменению поляризации лазерного излучения и поляризационным потерям. Исследование этих эффектов необходимо для их учета и компенсации при построении схемы лазера. Наконец, еще одной важной задачей является разработка лазерного квантрона, включающего систему высокоэффективного охлаждения АЭ и оптическую систему ввода излучения накачки в АЭ. Решение этой инженерной задачи требует разработки целого ряда технологий, которые зачастую не раскрываются ни коммерческими компаниями, ни научными коллективами.

Особый научный интерес представляет разработка лазеров, сочетающих высокую среднюю мощность и большую энергию импульсов короткой и сверхкороткой длительности. Наиболее перспективной геометрией АЭ для таких лазеров являются тонкие Yb:YAG диски, в которых, благодаря большой апертуре и малой толщине кристалла, не возникает нелинейных эффектов и эффекта пробоя при усилении высокоэнергичных импульсов. Однако такая геометрия не позволяет запастись большой энергией в среде из-за эффекта усиленного спонтанного излучения. В основном этот эффект связан с тем, что большая часть люминесценции (~85 %) оказывается запертой в диске из-за полного внутреннего отражения на его торцах. Перспективным решением, которое позволит существенно ослабить эффект усиленного спонтанного излучения, является использование композитного дискового АЭ Yb:YAG/YAG, который представляет собой тонкий диск Yb:YAG и толстый диск YAG, скрепленные торцевыми сторонами [11]. В таком АЭ у Yb:YAG фактически отсутствует одна из границ, и спонтанное излучение покидает легированную область, не успев усилиться. Использование композитной геометрии АЭ позволяет увеличить запасаемую энергию в среде, но при этом существенно увеличивается амплитуда фазовых искажений в АЭ. Исследование тепловых эффектов в такой геометрии – важнейшая задача для создания на ее основе лазера высокой средней мощности.

На основе АЭ из кристалла Yb:YAG представленных геометрий можно создавать лазеры высокой средней мощности с различными выходными парамет-

рами. Перспективным подходом для создания высокомошной лазерной системы является комбинирование АЭ различных геометрий, например, по следующей схеме: задающий генератор (на основе тонкого стержня или волокна), предусилитель (на основе тонкого стержня или тонкого слэба), конечный усилитель (на основе тонкого диска или композитного дискового АЭ).

### **Цель работы**

Целью диссертации является разработка методов и подходов для создания непрерывных и импульсных лазеров с высокой средней мощностью за счет использования активных элементов различных геометрий из кристалла Yb:YAG. В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Разработан метод измерения теплопроводности твердых тел и коэффициента теплопередачи контактов твердых тел. Измерена теплопроводность новых оптических сред и коэффициент теплопередачи ряда контактов, используемых в лазерной технике.
2. Теоретически и экспериментально исследованы тепловые эффекты и усиление в дисковом Yb:YAG и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активных элементах с торцевой диодной накачкой и уровнем допирования кристалла Yb:YAG 10 at.% и проведено их сравнение.
3. Теоретически и экспериментально исследованы тепловые эффекты и усиление в активном элементе формы тонкого стержня из кристалла Yb:YAG с торцевой диодной накачкой, распространяющейся в кристалле волноводным образом.
4. Предложена, исследована и реализована схема лазерного усилителя с высокой средней мощностью на основе активного элемента формы тонкого конического стержня из кристалла Yb:YAG, в котором излучение диодной накачки распространяется волноводным образом от большего торца к меньшему, а усиливаемое лазерное излучение распространяется свободно. Создан усилитель субпикосекундных импульсов.
5. Разработан квантрон на композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе, на базе которого создан высокоэффективный непрерывный лазер с высокой средней мощностью.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы подтверждается следующими полученными оригинальными результатами:

1. Предложен, теоретически исследован и экспериментально реализован новый относительный стационарный способ измерения теплопроводности твердых тел и коэффициента теплопередачи контактов твердых тел, включающий создание одномерного теплового потока через исследуемый объект, находящийся между двумя эталонными прозрачными телами, и изме-

- рение температуры в эталонных телах методом фазово-сдвиговой интерферометрии. Измерена теплопроводность новых оптических сред и коэффициент теплопередачи контактов, используемых в лазерной технике.
2. По итогам сравнительного анализа оптической силы тепловой линзы, термонаведенной деполяризации и усиления в дисковом Yb:YAG и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активных элементах с торцевой диодной накачкой и уровнем допирования кристалла Yb:YAG 10 at.% показано, что в композитном активном элементе благодаря меньшей плотности мощности излучения люминесценции из-за отсутствия полного внутреннего отражения на границе Yb:YAG и YAG ослабляется эффект нелинейного тепловыделения в Yb:YAG, возникающий при высокой плотности поглощенной мощности накачки.
  3. Проведено теоретическое исследование термонаведенных фазовых аберраций в дисковом Yb:YAG и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активных элементах с одинаковой геометрией Yb:YAG и прямоугольным пространственным профилем торцевой диодной накачки. Показано что величина фазовых аберраций в композитном активном элементе в определенной области геометрических параметров может быть меньше, чем в дисковом.
  4. Предложена, теоретически исследована и экспериментально реализована новая схема лазерного усилителя на основе активного элемента формы тонкого конического стержня из кристалла Yb:YAG, в котором излучение диодной накачки распространяется волноводным образом от большего торца к меньшему, а усиливаемое лазерное излучение распространяется свободно. Показано, что в такой схеме можно эффективно извлекать запасаемую мощность и получить высокий коэффициент усиления.
  5. Реализован четырехпроходный лазерный усилитель на основе активного элемента формы тонкого конического стержня из кристалла Yb:YAG с высоким усилением по слабому сигналу. Сигнал субпикосекундного волоконного лазера усилен до большой средней мощности при высокой оптической эффективности и сохранении хорошего качества пучка.
  6. Разработан квантрон на композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе, в котором достигнуто существенно большее усиление по слабому сигналу и большая запасенная энергия, чем обычно достигается в тонких Yb:YAG дисках при аналогичной непрерывной накачке, благодаря ослаблению влияния эффектов усиленного спонтанного излучения и нелинейного тепловыделения. На базе квантрона создан высокоэффективный непрерывный лазер с высокой средней мощностью.

### **Практическая ценность диссертации**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании лазеров высокой средней мощности. Использование активных элементов

представленных геометрий позволит достичь различных выходных параметров. В диссертации описаны решения как физических, так и инженерных задач, возникающих при создании лазеров. Кроме того, метод измерения теплопроводности твердых тел и метод измерения коэффициента теплопередачи контактов твердых тел, описанные в первой главе, имеют широкий спектр применения и могут быть использованы как в научных лабораториях, так и на производстве для исследования оптических материалов (кристаллы, стекла) и материалов термоинтерфейсов (термопасты, термоклеи).

Результаты работы легли в основу трех патентов: патент РФ на изобретение № 2558273 «Способ определения теплопроводности твердых тел», патент РФ на изобретение № 2569176 «Способ определения тепловой проводимости контактов твердых тел», патент РФ на изобретение (заявка № 2015119098) «Усилитель лазерного излучения с большим коэффициентом усиления, высокой средней и пиковой мощностью и высоким качеством выходного пучка».

В 2015-2016 годах работа получила поддержку фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках программы «УМНИК».

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

1. Использование в относительном стационарном методе измерения теплопроводности твердых тел и тепловой проводимости контактов твердых тел оптически прозрачных эталонов позволяет проводить измерение распределения температуры в них методом фазово-сдвиговой интерферометрии, что существенно увеличивает точность метода при исследовании образцов малого размера (от 1 до 10 мм).
2. Нелинейное тепловыделение, возникающее в дисковом Yb:YAG активном элементе с высоким уровнем допирования (~10 ат.% и более) при высокой плотности поглощенной мощности накачки (>30 кВт/см<sup>3</sup>) существенно ослабляется в композитной Yb:YAG/YAG геометрии, благодаря меньшей плотности мощности излучения люминесценции в кристалле Yb:YAG из-за отсутствия полного внутреннего отражения на границе Yb:YAG и YAG.
3. Величина фазовых аберраций в композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе меньше, чем в дисковом Yb:YAG активном элементе при одинаковой геометрии Yb:YAG и одинаковой торцевой диодной накачке с прямоугольным пространственным профилем, если отношение толщины Yb:YAG к диаметру накачки больше 0.05, а отношение толщины YAG к диаметру накачки больше 0.3.
4. В лазерном усилителе на основе тонкого Yb:YAG стержня (диаметр ~1 мм) с продольной волноводной диодной накачкой использование конического стержня, сужающегося в направлении распространения накачки, позволяет получить высокий погонный коэффициент усиления на всей длине стержня, что приводит к увеличению коэффициента усиления устройства

по крайней мере в 2 раза и более эффективному извлечению запасаемой мощности, по сравнению с обычным стержнем такой же длины и диаметром, равным диаметру большего торца.

5. В композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе достигается больший коэффициент усиления (1.25 вместо ~1.17) и большая запасаемая энергия (400 мДж вместо ~300 мДж), чем в тонком Yb:YAG диске при одинаковой толщине Yb:YAG, равной 300 мкм, и непрерывной накачке диаметром 6 мм за счет ослабления влияния эффектов усиленного спонтанного излучения и нелинейного тепловыделения.

### **Апробация работы**

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведенных автором в Институте прикладной физики РАН в 2011-2016 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИПФРАН и на следующих всероссийских и международных конференциях:

1. XV студенческая конференция по радиофизике, Нижний Новгород (2011)
2. XVI научная школа «Нелинейные волны», Нижний Новгород (2012)
3. VI всероссийская школа по лазерной физике, Саров (2012)
4. 15th International conference “Laser Optics 2012“, Saint-Petersburg (2012)
5. International Conference ICONO/LAT-2013, Moscow, Russia (2013)
6. 18-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская обл. (2013)
7. Conference “Advanced Solid-State Lasers” (ASSL-2013), Paris, France (2013)
8. Conference “Advanced Solid-State Lasers” (ASSL-2014), Shanghai (2014)
9. Conference “Science of the Future”, Saint-Petersburg, Russia (2014)
10. 16th International conference “Laser Optics 2014“, Saint-Petersburg, (2014)
11. 19-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская обл. (2014)
12. Conference “NWP-2014”, Nizhny Novgorod (2014)
13. Conference “Advanced Solid-State Lasers” (ASSL-2015), Berlin (2015)
14. 20-ая Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская обл. (2015)
15. 3rd International workshop “Laser Photonics”, Saint-Petersburg (2015)

По теме диссертации опубликовано 27 работ из которых 8 статей в реферируемых научных журналах из списка ВАК и 3 патента РФ.

### **Личный вклад**

Все экспериментальные результаты и результаты численного моделирования, представленные в диссертации, получены автором лично в тесном сотрудничестве с И. Б. Мухиным. Задача и основные направления исследования были определены научным руководителем О. В. Палашовым. Расчеты усиления, учитывающие эффект усиленного спонтанного излучения, представленные во второй главе работы, выполнялись совместно с О. Л. Вадимовой.



## Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка работ автора по теме диссертации. Общий объем диссертации составляет 102 страницы, включая 37 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 85 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертации, включающая актуальность темы работы, ее основные цели и задачи, научную новизну и практическую значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, личный вклад автора, сведения о структуре и объеме работы. Затем представлено основное содержание.

**Первая глава** посвящена исследованию тепловых параметров лазерной системы, определяющих распределение температуры в активном элементе (АЭ) лазера. В стационарном тепловом режиме при известном тепловыделении распределение температуры в системе определяется теплопроводностью ее составляющих и граничными условиями, характеризуемыми коэффициентами теплопередачи контактов твердых тел и коэффициентами теплоотдачи между твердыми телами и хладагентом.

*В первой части главы* описывается новый стационарный способ измерения теплопроводности твердых тел, позволяющий измерять образцы малого размера (характерный размер по каждой координате от 1 мм до 10 мм), что делает его применимым для исследования оптических сред. Схема метода представлена на рис. 1.

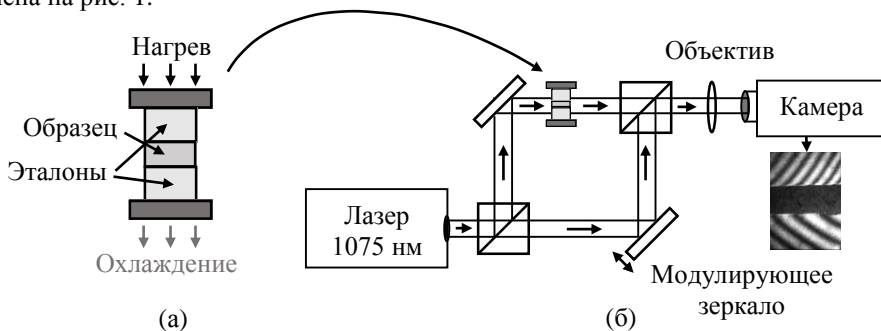


Рис.1. Схема измерения теплопроводности. (а) Конструкция, используемая при измерении. (б) Схема интерферометра Маха-Цендера

Метод заключается в создании одномерного теплового потока через образец, закрепленный между двумя эталонными прозрачными телами, измерении распределения температуры в эталонных телах методом фазово-сдвиговой ин-

терфферометрии и вычислении теплопроводности образца из полученного распределения температуры и теплопроводности эталонов. Работоспособность метода проверена на образцах с известной теплопроводностью из плавленного кварца КУ, кристалла TGG и нержавеющей стали 12X18H10T. Получено хорошее совпадение с табличными величинами (отличие < 5 %). С помощью метода проведены измерения теплопроводности нескольких новых оптических сред: керамика Се:TAG, керамика  $MgAl_2O_4$  и магнито-оптическое стекло  $Tb_2O_3-B_2O_3-GeO_2$ . Их теплопроводности составили  $5 \pm 0.35$  Вт/м/К,  $12 \pm 0.5$  Вт/м/К и  $1.45 \pm 0.1$  Вт/м/К соответственно.

*Во второй части главы* описывается новый метод измерения коэффициента теплопередачи контактов твердых тел, одно из которых прозрачно, а второе обладает высокой теплопроводностью. Метод применяется для исследования тепловых контактов в лазерной технике, где в качестве прозрачного тела выступает АЭ лазера, а в качестве высокотеплопроводного тела – радиатор. Метод фактически является модификацией описанного в первой части метода измерения теплопроводности, в котором исследуемый образец заменяется на тело с известной высокой теплопроводностью. В качестве исследуемого объекта при этом выступают контакты высокотеплопроводного тела с прозрачными телами, на которых применяются различные промежуточные материалы. Исследован ряд контактов, используемых в лазерной технике: через термоклей марки «Radial», через термопасту марки «Zalman ZM-STG1», через индиевый припой, а также через индиевый припой, когда на контактные поверхности прозрачных тел нанесены диэлектрические зеркала (10 слоев  $SiO_2$  и  $HfO_2$ ). Коэффициенты теплопередачи для них составили  $1.3 \pm 0.1$  Вт/см<sup>2</sup>/К,  $4 \pm 0.4$  Вт/см<sup>2</sup>/К,  $20 \pm 5$  Вт/см<sup>2</sup>/К и  $12 \pm 2$  Вт/см<sup>2</sup>/К соответственно. Впервые экспериментально показано значительное влияние диэлектрического зеркала на коэффициент теплопередачи контакта, которое необходимо учитывать при построении схем, где АЭ выступает в роли «активного зеркала» (дисковые и микрочип лазеры).

*В третьей части главы* проводится исследование коэффициента теплоотдачи на границе радиатора и воды в системе охлаждения, спроектированной для дисковых лазеров, методом инфракрасной термометрии. Исследуются два типа металлических радиаторов: радиатор с плоской охлаждаемой поверхностью и радиатор с мелкомасштабной насечкой на охлаждаемой поверхности, которая увеличивает площадь контакта с водой. Согласно измерению нанесение насечки позволило увеличить коэффициент теплоотдачи почти вдвое (с 3.3 Вт/см<sup>2</sup>/К до 5.5 Вт/см<sup>2</sup>/К).

**Вторая глава** посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию тепловых эффектов (нагрев, фазовые и поляризационные искажения излучения) и усиления в АЭ из кристалла Yb:YAG различных геометрий.

*В первой части главы* описывается численная модель для расчета усиления и тепловых эффектов, позволяющая исследовать любые аксиально-симметричные геометрии АЭ, рассматривать смежные с Yb:YAG элементы, влияющие на

распределение температуры, напряжения и деформации в нем (радиатор, кристалл YAG в композитном АЭ) и учитывающая зависимости параметров АЭ от температуры. Модель основана на совместном решении системы балансных уравнений для кристалла Yb:YAG и нелинейного нестационарного уравнения теплопроводности. Стационарное распределение температуры в системе находится методом конечных разностей с применением явной схемы. Из полученного распределения температуры вычисляются тензоры напряжения и деформации в системе, а затем находятся фазовые и поляризационные искажения излучения в АЭ. Фазовые искажения разделяются на параболическую и непараболическую составляющие. Для параболической части вычисляется оптическая сила тепловой линзы, для непараболической –  $M^2$  фактор гауссова пучка с соответствующим фазовым фронтом. Для оценки влияния тепловой линзы в АЭ на пучок лазерного излучения проводится расчет собственной  $TEM_{00}$  моды оптического резонатора, содержащего АЭ. Из стационарного распределения инверсии в кристалле Yb:YAG находится усиление по слабому сигналу в АЭ.

Во второй части главы проводится теоретическое и экспериментальное исследование тепловых эффектов и усиления в двух геометриях АЭ: дисковый Yb:YAG АЭ и композитный дисковый Yb:YAG/YAG АЭ (тонкий диск Yb:YAG и толстый диск YAG, скрепленные торцами) с торцевой диодной накачкой и уровнем допирования кристалла Yb:YAG 10 at.%. Схема охлаждения, накачки и усиления для обоих АЭ представлена на рис. 2.

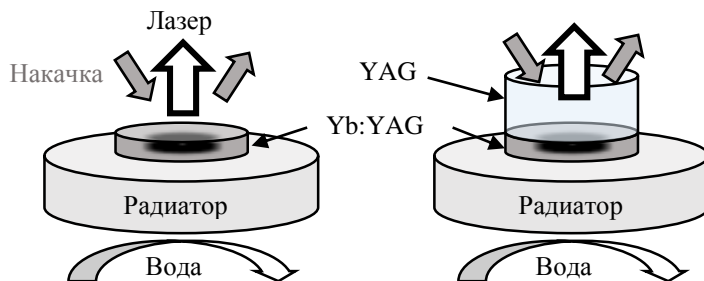


Рис. 2. Схема охлаждения, накачки и усиления для дискового Yb:YAG АЭ (слева) и композитного дискового Yb:YAG/YAG АЭ (справа)

Использование композитной геометрии позволяет ослабить эффект усиленного спонтанного излучения (УСИ) в АЭ. Это связано с тем, что в дисковых АЭ большая часть люминесценции (~85 %) не может покинуть кристалл из-за полного внутреннего отражения на его торцах. В композитной геометрии отсутствует отражение на границе Yb:YAG и YAG, и люминесценция свободно покидает область Yb:YAG [11]. При этом кристалл YAG сильно влияет на тепловые эффекты в АЭ, исследование которых необходимо для достижения высокой средней мощности.

В результате теоретического и экспериментального исследования оптической силы тепловой линзы, термонаведенной деполаризации и усиления в рассматриваемых АЭ впервые показано, что в композитной геометрии АЭ ослабляется эффект нелинейного тепловыделения в Yb:YAG, возникающий при высокой плотности поглощенной мощности накачки ( $>30$  кВт/см<sup>3</sup>). Эффект связан с формированием поглощающих Yb<sup>2+</sup> центров в результате кооперативного взаимодействия ионов Yb<sup>3+</sup> и считается главной проблемой, не позволяющей использовать кристаллы с высоким уровнем допирования ( $>10$  ат.%) в дисковых лазерах [12]. Ослабление нелинейного тепловыделения в композитном АЭ свидетельствует о том, что эффект УСИ играет важную роль в данном процессе, что продемонстрировано впервые.

Теоретический анализ термонаведенных фазовых aberrаций в рассматриваемых АЭ показал, что в композитном АЭ возникает сильная параболическая линза, но при этом величина фазовых aberrаций будет даже меньше, чем в дисковом АЭ с такой же геометрией Yb:YAG и аналогичной накачкой, если отношение толщины Yb:YAG к диаметру накачки больше 0.05, а отношение толщины YAG к диаметру накачки больше 0.3. Дисковые АЭ с такой геометрией активно применяются в лазерах и их замена на композитные АЭ приведет к уменьшению aberrаций в системе и, как следствие, к лучшему качеству пучка на выходе, что показано впервые.

Проведено экспериментальное исследование усиления по слабому сигналу в композитном АЭ со следующими параметрами: толщина Yb:YAG 300 мкм, допирование 10 ат.%, толщина YAG 0.7 мм, диаметр кристалла 10 мм, диаметр накачки 6 мм. Благодаря ослаблению влияния эффектов УСИ и нелинейного тепловыделения в композитной геометрии АЭ удалось достичь большего коэффициента усиления по слабому сигналу (1.25 вместо  $\sim 1.17$ ) и большей запасаемой энергии (400 мДж вместо  $\sim 300$  мДж), чем в дисковых АЭ с такой же геометрией Yb:YAG и аналогичной накачкой [13].

В третьей части главы проводится исследование тепловых эффектов и усиления в Yb:YAG АЭ геометрии тонкого стержня (диаметр  $\sim 1$  мм, длина  $\sim 3$  см) с торцевой волноводной накачкой [14], а также предлагается и исследуется новая геометрия АЭ - тонкий конический стержень. Схема охлаждения, накачки и усиления для данных геометрий АЭ представлена на рис. 3.

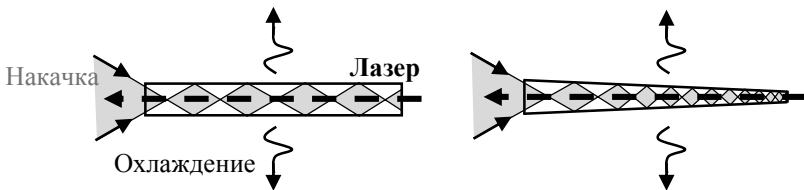


Рис. 3. Схема охлаждения, накачки и усиления для АЭ формы тонкого цилиндрического стержня (слева) и тонкого конического стержня (справа)

АЭ формы тонкого стержня эффективно охлаждается через боковую поверхность благодаря малому диаметру, что позволяет работать при высокой средней мощности. На его основе может быть построен усилитель с большим коэффициентом усиления и высокой энергией импульсов ( $>1$  мДж). Однако в такой геометрии АЭ возникает сильная продольная неоднородность интенсивности накачки и сигнального излучения, что ограничивает коэффициент усиления за проход АЭ и эффективность извлечения запасаемой мощности. С помощью теоретического расчета было показано, что использование АЭ формы тонкого конического стержня, в котором излучение диодной накачки распространяется волноводным образом от большего торца к меньшему, а усиливаемое лазерное излучение распространяется свободно в обратном направлении, позволяет получить почти равномерное продольное распределение интенсивности накачки и сигнала в АЭ. В результате коэффициент усиления за проход стержня увеличивается по крайней мере в 2 раза, и увеличивается эффективность извлечения запасаемой мощности, по сравнению с цилиндрическим стержнем такой же длины и диаметром, равным диаметру большего торца.

Разработаны лазерные квантроны с цилиндрическим (диаметр 1.2 мм, длина 3 см) и коническим (диаметры 1.2 мм и 0.6 мм, длина 3 см) стержнями с применением оригинальных технологических подходов. В квантроне с коническим стержнем достигнуто высокое усиление по слабому сигналу ( $>10$  раз), что почти вдвое больше, чем в цилиндрическом стержне при аналогичной накачке. Исследование тепловых эффектов показало, что в цилиндрическом стержне возникает сильная тепловая линза, фокусное расстояние которой может быть короче длины АЭ. Однако линза может быть учтена при построении оптической схемы лазера. Она слабо влияет на размер пучка в кристалле, так как он достаточно мал.

**Третья глава** посвящена разработке двух лазерных систем высокой средней мощности на основе АЭ рассматриваемых геометрий.

*В первой части главы* описывается непрерывный лазер на основе композитного дискового  $\text{Yb:YAG/YAG}$  АЭ. Подробно рассматривается разработанный лазерный квантрон, который включает систему высокоэффективного водного охлаждения АЭ и телескопическую схему ввода накачки в АЭ, обеспечивающую 10 отражений излучения от кристалла для его полного поглощения. Собран устойчивый лазерный резонатор с большим количеством поперечных мод. Результаты по лазерной генерации получены для двух различных конфигураций АЭ и систем охлаждения: АЭ с толстым кристаллом  $\text{YAG}$  (4 мм), смонтированный на композитный радиатор из молибдена и меди толщиной 1 мм, и АЭ с тонким кристаллом  $\text{YAG}$  (0.7 мм), смонтированный на радиатор из поликристаллического алмаза, выращенного в ИПФРАН методом химического осаждения из газовой фазы [15], толщиной 2 мм. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки для двух конфигураций представлены на рис. 4.

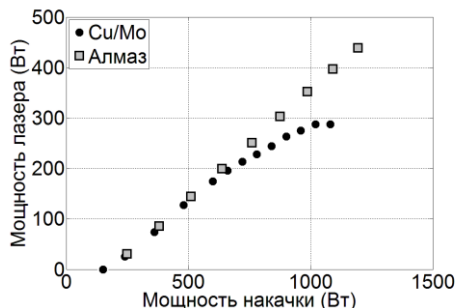


Рис. 4. Зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки для АЭ с толстым YAG и металлическим радиатором (круги) и для АЭ с тонким YAG и алмазным радиатором (квадраты)

В лазере с металлическим радиатором при большой мощности накачки уменьшается КПД, что связано с сильным нагревом АЭ. Максимальный дифференциальный КПД составил 42 %, оптический КПД – 27 %, а максимальная мощность – 300 Вт. Использование алмазного радиатора позволило существенно уменьшить температуру АЭ, что привело к увеличению КПД лазера и дало возможность увеличить плотность мощности накачки в АЭ. Достигнута средняя мощность 440 Вт при дифференциальном КПД 44 % и оптическом КПД 37 %. Мощность лазера может быть масштабирована в киловаттный диапазон увеличением диаметра пучка накачки на АЭ при сохранении ее плотности мощности. Эффективность генерации получилась чуть ниже, чем в дисковых Yb:YAG АЭ [16], что связано с линейным поглощением излучения в кристалле YAG. Использование кристаллов лучшего качества позволит решить эту проблему.

*Во второй части главы* описывается субпикосекундный лазер, представляющий собой коммерческий волоконный иттербиевый лазер с оригинальным четырехпроходным лазерным усилителем на основе тонкого конического Yb:YAG стержня (длина 30 мм, диаметры торцов 1.2 мм и 0.6 мм). Сигнал волоконного лазера (мощность 3 Вт, частота следования импульсов 3 МГц, длительность импульсов ~300 фс) проходит через стрэтчер на основе объемных чирпированных брегговских решеток. В стрэтчере импульсы растягиваются до 1.25 нс, ширина спектра обужается до 1.6 нм, и выходная мощность падает до 0.22 Вт, после чего сигнал подается на усилитель. На выходе усилителя достигнута мощность сигнала 15 Вт при оптическом КПД усилителя около 20 %. При этом профиль пучка на выходе усилителя повторяет профиль пучка на входе. Это означает, что фазовые aberrации в усилителе малы. Исследование временного и спектрального профилей выходных импульсов показало, что ширина спектра сигнала в усилителе уменьшилась с 1.6 нм до 1 нм, что привело к уменьшению длительности импульсов от 1.25 нс до 0.8 нс. Такие импульсы могут быть компрессированы до длительности менее 1 пс.

В заключении приводятся основные результаты работы и обсуждаются перспективные направления продолжения исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложен, теоретически исследован и экспериментально реализован относительный стационарный способ измерения теплопроводности твердых тел и коэффициента теплопередачи контактов твердых тел, включающий создание одномерного теплового потока через исследуемый объект, находящийся между двумя эталонными прозрачными телами, и измерение температуры в эталонных телах методом фазово-сдвиговой интерферометрии. Измерена теплопроводность новых оптических сред и коэффициент теплопередачи ряда контактов, используемых в лазерной технике. Теплопроводности керамики  $\text{Ce:TAG}$ , керамики  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  и магнито-оптического стекла  $\text{Tb}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-GeO}_2$  равны  $5 \pm 0.35$  Вт/м/К,  $12 \pm 0.5$  Вт/м/К и  $1.45 \pm 0.1$  Вт/м/К соответственно.
2. Проведен теоретический и экспериментальный сравнительный анализ оптической силы тепловой линзы, термонаведенной деполяризации и усиления в дисковом  $\text{Yb:YAG}$  и композитном дисковом  $\text{Yb:YAG/YAG}$  активных элементах с торцевой диодной накачкой и уровнем допирования кристалла  $\text{Yb:YAG}$  10 at.%. Показано, что в композитном активном элементе благодаря меньшей плотности мощности излучения люминесценции из-за отсутствия полного внутреннего отражения на границе  $\text{Yb:YAG}$  и  $\text{YAG}$  ослабляется эффект нелинейного тепловыделения в  $\text{Yb:YAG}$ , возникающий при высокой плотности поглощенной мощности накачки ( $>30$  кВт/см<sup>2</sup>).
3. Проведено теоретическое исследование термонаведенных фазовых аберраций в дисковом  $\text{Yb:YAG}$  и композитном дисковом  $\text{Yb:YAG/YAG}$  активных элементах с одинаковой геометрией  $\text{Yb:YAG}$  и прямоугольным пространственным профилем торцевой диодной накачки. Показано что величина фазовых аберраций в композитном активном элементе меньше, чем в дисковом, если отношение толщины  $\text{Yb:YAG}$  к диаметру накачки больше 0.05, а отношение толщины  $\text{YAG}$  к диаметру накачки больше 0.3.
4. Предложена, теоретически исследована и экспериментально реализована схема лазерного усилителя на основе активного элемента формы тонкого конического стержня из кристалла  $\text{Yb:YAG}$ , в котором излучение диодной накачки распространяется волноводным образом от большего торца к меньшему, а усиливаемое лазерное излучение распространяется свободно. Показано, что в такой схеме можно получить высокий погонный коэффициент усиления на всей длине стержня, что приводит к увеличению коэффициента усиления устройства по крайней мере в 2 раза и более

эффективному извлечению запасаемой мощности, по сравнению с обычным стержнем такой же длины и диаметром, равным диаметру большего торца.

5. Реализован четырехпроходный лазерный усилитель на основе активного элемента формы тонкого конического стержня из кристалла Yb:YAG (диаметры торцов 1.2 и 0.6 мм, длина 30 мм). Достигнуто высокое ( $>10$  раз) усиление по слабому сигналу за один проход стержня. Сигнал субпикосекундного волоконного лазера мощностью 0.22 Вт с частотой повторения 3 МГц усилен до 15 Вт при оптической эффективности 20 % и сохранении хорошего качества пучка.
6. Разработан квантрон на композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе (толщина Yb:YAG 300 мкм, допирование 10 at.%, толщина YAG 0.7 мм, диаметр кристалла 10 мм, диаметр накачки 6 мм). За счет ослабления влияния эффектов усиленного спонтанного излучения и нелинейного тепловыделения достигнуто усиление по слабому сигналу 1.25 и запасенная энергия 400 мДж при непрерывной накачке. На базе квантрона создан высокоэффективный непрерывный лазер мощностью 440 Вт и КПД 37 %.

### Цитируемая литература

- [1] *B. A. Reagan, M. Berrill, K. A. Wernsing, C. Baumgarten, M. Woolston, J. J. Rocca* High-average-power, 100-Hz-repetition-rate, tabletop soft-x-ray lasers at sub-15-nm wavelengths // *Physical Review A*. - 2014. - Т.89. - С.053820.
- [2] *F. Emaury, A. Diebold, C. J. Saraceno, U. Keller* Oscillator-driven high harmonic generation // *Advanced Solid State Lasers, OSA Technical Digest* (online). - 2015. - ATu4A.5.
- [3] *I. Pupeza, D. Sánchez, J. Zhang, N. Lilienfein, M. Seidel, N. Karpowicz, T. Paasch-Colberg, I. Znakovskaya, M. Pescher, W. Schweinberger, V. Pervak, E. Fill, O. Pronin, Z. Wei, F. Krausz, A. Apolonski, J. Biegert* High-power sub-two-cycle mid-infrared pulses at 100 MHz repetition rate // *Nature Photonics*. - 2015. - Т.9. - С.721-724.
- [4] *W. Schneider, A. Ryabov, C. Lombosi, T. Metzger, Z. Major, J. A. Fülöp, P. Baum* 800-fs, 330- $\mu$ J pulses from a 100-W regenerative Yb:YAG thin-disk amplifier at 300 kHz and THz generation in LiNbO<sub>3</sub> // *Optics Letters*. - 2014. - Т.39. - №23. - С.6604-6607.
- [5] Summary report of the workshop on “Laser Technology for Accelerators” - 2013.
- [6] *C. Phipps, M. Birkan, W. Bohn, H.-A. Eckel, H. H., T. Lippert, M. Michaelis, Y. Rezunkov, A. Sasoh, W. Schall, S. Scharring, J. Sinko* Review: laser-ablation propulsion // *Journal of Propulsion and Power*. - 2010. - Т.26. - №4. - С.609-637.



- [7] *R. Soulard, M. N. Quinn, T. Tajima, G. Mourou* ICAN: A novel laser architecture for space debris removal // *Acta Astronautica*. - 2014. - T.105. - C.192-200.
- [8] *Y. Kalisky, O. Kalisky* The status of high-power lasers and their applications in the battlefield // *Optical Engineering*. - 2010. - T.49. - №9. - C.091003.
- [9] *G. A. Bogomolova, D. N. Vylegzhanin, A. A. Kaminskii* Spectral and lasing investigations of garnets with Yb<sup>3+</sup> ions // *Sov. Phys. JETP*. - 1976. - T.42. - №3. - C.440-446.
- [10] *Y. Sato, J. Akiyama, T. Taira* Effects of rare-earth doping on thermal conductivity in Y3Al5O12 crystals // *Optical Materials*. - 2009. - T.31. - C.720-724.
- [11] *D. Kouznetsov, J.-F. Bisson* Role of undoped cap in the scaling of thin-disk lasers // *JOSA B*. - 2008. - T.25. - №3. - C.338-345.
- [12] *N. Korneev, P. Rodriguez-Montero, U. Wolters, K. Petermann, G. Huber* Nonlinear losses in photoconductive Yb:YAG laser materials: identification of photocarrier properties by non-steady-state photoEMF // *Applied Physycs B*. - 2014. - T.117. - №2. - C.731-735.
- [13] *J. Speiser, A. Giesen* Scaling of thin disk pulse amplifiers // *Proc. of SPIE*. - 2008. - T.6871. - C.68710J.
- [14] *X. Délen, Y. Zaouter, I. Martial, N. Aubry, J. Didierjean, C. Hönninger, E. Mottay, F. Balembos, P. Georges* Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources // *Optics Letters*. - 2013. - T.38. - №2. - C.109-111.
- [15] *S. A. Bogdanov, A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, A. B. Muchnikov, D. B. Radishev, N. M. Ovechkin, V. V. Parshin* Growth rate enhancement of high quality low-loss CVD diamond disks grown for microwave windows application // *Chemical Vapour Deposition*. - 2014. - T.20. - №1-2-3. - C.201-206.
- [16] *S.-S. Schad, V. Kuhn, T. Gottwald, V. Negoita, K. A., K. Wallmeroth* Near fundamental mode high-power thin-disk laser // *Proc. of SPIE*. - 2014. - T.8959. - C.89590U.

### **Основные материалы диссертации опубликованы в работах:**

- 1a. *I. Kuznetsov, I. Mukhin, D. Silin, O. Palashov* Thermal conductivity measurements using phase-shifting interferometry // *Optical Materials Express*. – 2014. - T. 4. - № 10. - C. 2204-2208.
- 2a. *I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, D. E. Silin, A. G. Vyatkin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov* Thermal effects in end-pumped Yb:YAG thin-disk and Yb:YAG/YAG composite active element // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 2014. - T. 50. - № 3. - C. 133-140.

- 3а. *I. Kuznetsov, I. Mukhin, O. Vadimova, O. Palashov, K.-I. Ueda* Thermal effects in Yb:YAG single-crystal thin-rod amplifier // *Applied Optics*. – 2015. – Т. 54. – № 25. – С. 7747-7752.
- 4а. *O.L. Vadimova, I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, E.A. Perevezentsev, O.V. Palashov* Comparison of composite and disk shaped active elements for pulsed lasers // *Laser Physics*. - 2015. - № 25. - С. 095001.
- 5а. *И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, О. Л. Вадимова, О. В. Палашов* Дискový лазер на основе композитного Yb:YAG/YAG активного элемента // *Квант. электроника*. – 2015 – Т. 45. - № 3. – С. 207-210.
- 6а. *I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.V. Palashov* Improvement of thermal management in composite Yb:YAG/YAG thin-disk laser // *Laser Physics*. – 2016. – Т. 26. - № 4. – С. 045004.
- 7а. *Е.А. Перевезенцев, И.Б. Мухин, И.И. Кузнецов, О.Л. Вадимова, О.В. Палашов* Задающая система криогенного дискového Yb:YAG-лазера // *Квантовая электроника*. – 2015. – Т. 45. - № 5. - С. 451-454.
- 8а. *И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, Палашов О. В.* Усилитель на тонком стержне из Yb:YAG с высокой энергией в импульсе для волоконного задающего лазера // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46. - № 4. - принята к печати.
- 9а. *Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Силин Д.Е., Палашов О.В.* Способ определения теплопроводности твердых тел // Патент № 2558273, приоритет от 17.12.2013.
- 10а. *Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашов О.В.* Способ определения тепловой проводимости контактов твердых тел // Патент № 2558273, приоритет от 03.06.2014.
- 11а. *Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашов О.В.* Усилитель лазерного излучения с большим коэффициентом усиления, высокой средней и пиковой мощностью и высоким качеством выходного пучка // Заявка на патент № 2015119098, приоритет от 20.05.2015.
- 12а. *И.И. Кузнецов, И.Б. Мухин* Разработка мощного дискového Yb:YAG лазера с высоким качеством пучка // Труды XV научной конференции по радиофизике - 2011, Нижний Новгород, ННГУ.
- 13а. *И.И. Кузнецов, И.Б. Мухин* Дискový Yb:YAG лазер с большой средней и пиковой мощностью // Труды научной школы «Нелинейные волны-2012», г. Нижний Новгород, 2012.
- 14а. *И.И. Кузнецов, И.Б. Мухин* Особенности разработки дискových лазеров с высокой средней мощностью в условиях комнатных и криогенных температур // Сборник докладов VI Всероссийской школы по лазерной физике и лазерным технологиям, Нижегородская обл., г. Саров, 2012.
- 15а. *I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.V. Palashov* Specificity of Developing of High Power Disk Laser at Cryogenic and Room Temperature Conditions // *Laser Optics* – 2012, St.Petersburg, Russia, TuR1-09.
- 16а. *Кузнецов И. И., Мухин И. Б., Палашов О. В.* Разработка оптического квантового генератора с высокой средней и пиковой мощностью на основе

- дисковых активных элементов // Сборник докладов 18-ой Нижегородской сессии молодых ученых - 2013, Нижегородская область.
- 17a. *I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.V. Palashov* Thermal effects in Yb:YAG thin disk and Yb:YAG/YAG composite active elements // ICONO/LAT-2013, Moscow, LTuE4.
- 18a. *I. Kuznetsov, I Mukhin, O. Vadimova, E. Perevezentsev, O. Palashov* Comparison of thermal effects in Yb:YAG disk laser head at room and cryogenic temperature conditions // Advanced Solid-State Lasers Congress - 2013, Paris, OSA Technical Digest, AM4A.33.
- 19a. *Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашиов О.В.* Управление температурным режимом твердотельных лазеров высокой средней мощности // Тезисы докладов 19-ой Нижегородской сессии молодых ученых - 2014, Нижегородская область.
- 20a. *I. Kuznetsov, I. Mukhin, O. Palashov* High-power thin-disk laser with composite Yb:YAG/YAG active element // Laser Optics - 2014, St. Petersburg, conference proceedings, TuR1-03.
- 21a. *I. Kuznetsov, I. Mukhin, O. Palashov* Thin-rod amplifier for fiber lasers scaling // Laser Optics - 2014, St. Petersburg, conference proceedings, TuR1-04.
- 22a. *I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.V. Palashov* Optical media and interfaces thermal conductivity measurement with new optical methods // Science of the Future - 2014, Saint-Petersburg, book of abstracts.
- 23a. *I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov* Application of Composite Yb:YAG/YAG Active Element for High Average and Peak Power Lasers Development // International Symposium Topical Problems of Nonlinear Wave Physics - 2014, book of abstracts.
- 24a. *I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov* Thin-disk multipass amplifier with composite Yb:YAG/YAG // Advanced Solid-State Lasers Congress - 2014, Shanghai, OSA Technical Digest, AM5A.38.
- 25a. *Кузнецов И.И., Мухин И.Б., Палашиов О.В.* Дисковый лазер на основе композитного активного элемента из Yb:YAG/YAG // Тезисы докладов 20-ой Нижегородской сессии молодых ученых - 2015, Нижегородская область, стр. 33-34.
- 26a. *Kuznetsov I.I.* High average and peak power thin-disk laser amplifier with composite Yb:YAG/YAG active element // 3rd International workshop for young scientists "Laser Photonics", Saint-Petersburg, book of abstracts.
- 27a. *I.I. Kuznetsov, I.B. Mukhin, O.L. Vadimova, O.V. Palashov, K.-I. Ueda* Thin-tapered-rod Yb:YAG single-crystal laser amplifier // Advanced Solid-State Lasers Congress – 2015, Berlin, OSA Technical Digest, AM5A.33.

КУЗНЕЦОВ Иван Игоревич

**ЛАЗЕРЫ С ВЫСОКОЙ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ НА ОСНОВЕ УВ:УАГ  
ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГЕОМЕТРИЙ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 30.03.2016 г.  
Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Усл. печ. л. 1,25.  
Тираж 100 экз. Заказ № (2016).

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