

На правах рукописи

ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Евгений Александрович

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ ДИСКОВЫХ
ЛАЗЕРОВ НА ИТТЕРБИЕВЫХ СРЕДАХ
С КРИОГЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

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 — 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН), 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, главный научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова;

Петров Виктор Валерьевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

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

Защита состоится "14" октября 2019 г. в 15.00 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 "14" августа 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Предмет исследования и актуальность темы

Появление диодной накачки и бурное развитие технологий ее изготовления позволило достичь выдающихся результатов по генерации лазерного излучения с высокой средней мощностью. Одним из наиболее ярких примеров успешного внедрения фундаментальных научных исследований является применение лазерных технологий в производстве. Лазеры уже много лет применяются в промышленности для решения широкого круга задач (сварка, резка, упрочнение, усадка, очистка, маркировка, литография и т.п.). Быстрый рост производства в критических отраслях промышленности требует сокращения времени изготовления деталей с одновременным увеличением их сложности и повышением требований к качеству. Поэтому одной из наиболее актуальных на сегодняшний день наукоемких задач является увеличение средней мощности как непрерывных, так и импульсно-периодических промышленных лазеров, что позволяет повышать качество и скорость выполняемых процессов и расширять круг выполняемых процедур. Перманентное внедрение лазерных технологий в производство провоцирует новые разработки и усовершенствования лазерных источников. Ярким примером международных проектов по разработке лазерных систем для промышленности является проект HiLASE [1], в рамках которого разрабатывается ряд импульсно-периодических лазеров с энергией в импульсе от десятков джоулей до нескольких микроджоулей.

Наряду с промышленными, лазеры с высокой средней и пиковой мощностью имеют широкий спектр научных приложений. В основном они используются в качестве накачки в различных процессах нелинейных оптических преобразований: от широкополосного оптического параметрического усиления чирпированных импульсов (ОПСРА) [2, 3] до создания источников излучения рентгеновского [4], ультрафиолетового [5, 6], среднего инфракрасного [7] и терагерцового [8] диапазонов, а также в области ускорения заряженных частиц [9]. Однако малая энергия импульсов таких лазеров существенно ограничивает возможности их приложений.

В твердотельных лазерах, благодаря значительно большему диаметру пучка по сравнению с волоконными лазерами, проблема увеличения пиковой мощности стоит не так остро. Однако достижение высокой средней мощности является более трудоемкой задачей, поскольку лазерный пучок подвергается воздействию тепловых эффектов в активном элементе (АЭ) лазера. Необходимым условием для обеспечения эффективного охлаждения активного элемента является его малый размер по координате, вдоль которой осуществляется охлаждение. На сегодняшний день активно разрабатываются лазеры, использующие следующие геометрии АЭ: «тонкий стержень», «тонкий слэб» и «тонкий диск». Достаточно весомые лазерные результаты получены при

использовании геометрии «тонкий стержень» и «тонкий слэб», но наибольшая энергия импульсов достигнута при использовании активных элементов из кристалла Yb:YAG геометрии тонкого диска, в которой охлаждение происходит вдоль оси распространения пучка и не ограничивает апертуру АЭ. Энергия, получаемая из одного диска при использовании водяного охлаждения, ограничена на уровне ~100 мДж.

Для достижения большей энергии импульсов используют сложную, но перспективную технику криогенного охлаждения лазерных активных элементов. Интерес к применению данного подхода начинается практически сразу после изобретения лазеров. Качественные изменения в области криогенных иттербиевых лазеров произошли в начале 90-х годов XX века в связи с появлением мощных полупроводниковых InGaAs лазеров накачки на длине волны 940 нм. При охлаждении Yb:YAG до криогенных температур улучшаются как материальные [10-12] так и лазерные [13, 14] константы, а за счет опустошения нижнего рабочего уровня среда становится четырехуровневой. На сегодняшний день продемонстрированы уникальные криогенные Yb:YAG лазеры для решения целого ряда смелых и амбициозных задач: лазерное плазменное ускорение заряженных частиц [15], создание компактных источников мощного рентгеновского излучения [16], накачка параметрических усилителей и фемтосекундных титан-сапфировых лазеров с высокой средней и пиковой мощностью [17, 18]. Однако для создания криогенного лазера необходимо решение целого ряда сложных задач и разработка различных сопутствующих технологий.

Также непрерывно идет поиск новых перспективных (с лучшими свойствами) лазерных сред и разработка методов их изготовления. Материал для изготовления активных элементов лазеров с высокой средней мощностью должен обладать хорошими термооптическими и лазерными характеристиками, а метод производства такого материала должен позволять изготавливать оптические элементы высокого оптического качества, больших размеров, относительно быстро, дешево и в достаточных количествах. Технология получения высококачественной оптической керамики, предложенная в [19], является одним из перспективных методов производства лазерных сред, удовлетворяющих этим требованиям. Одними из самых перспективных керамических материалов для АЭ лазеров с высокой средней и пиковой мощностью являются на сегодняшний день полупрозрачные оксиды металлов, имеющие кубическую решетку (Sc_2O_3 , Y_2O_3 и Lu_2O_3) и активированные ионом Yb^{3+} . По сравнению с широко распространенным Yb:YAG, эти материалы обладают большей теплопроводностью, лучшими термооптическими свойствами, ответственными за тепловую линзу и термонаведенную деполяризацию, и более широким спектром усиления.

Диссертационная работа посвящена исследованию целого спектра научных и технических проблем в рамках задачи по созданию криогенных дисковых иттербиевых лазерных систем с одновременно высокой средней по вре-

мени и пиковой мощностью. Сюда входит как диагностика и выбор подходящих лазерных сред, так и разработка методов и подходов борьбы с усиленным спонтанным излучением, выбор подходящей системы стретчер-компрессор, поиск и реализация новых оптических схем многопроходных усилителей, а также внедрение технологии охлаждения при помощи жидкого азота.

Цель работы

Целью диссертационной работы является изучение особенностей криогенных дисковых иттербиевых импульсно-периодических лазерных систем с одновременно высокой средней и пиковой мощностью.

В ходе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Измерены спектральные и лазерные характеристики Yb:YAG и полупроводниковых оксидов Yb:Y₂O₃, Yb:Lu₂O₃ и Yb:Sc₂O₃ в диапазоне температур 80÷300 К. Разработаны методы оценки качества данных материалов, исходя из поведения характеристик при охлаждении до криогенных температур.

2. Разработан простой метод термодиффузионной сварки оптических элементов при помощи обычной муфельной печи с нагревом в воздушной атмосфере без какого-либо сдавливающего воздействия при высоких температурах.

3. Проведен сравнительный анализ трех наиболее часто используемых критериев качества пучка – интеграл перекрытия χ , число Штреля S и M^2 – при тепловых искажениях, самофокусировке и сферических искажениях гауссовых и супергауссовых пучков. Исследована возможность улучшения значений перечисленных критериев.

4. Проведено сравнение стретчеров и компрессоров на базе ДР (дифракционных решеток) и ОЧБР (объемных чирпирующих брэгговских решеток) в криогенном дисковом иттербиевом лазере. Создан программный код для расчета пары стретчер-компрессор на базе ДР, рассчитана и экспериментально реализована схема стретчера на ДР 1200 штрихов/мм, а также рассчитана оптимальная схема на ДР 1740 штрихов/мм. Экспериментально реализован компактный и простой в юстировке стретчер на базе двух ОЧБР.

5. Предложены и экспериментально реализованы два варианта многопроходного дискового лазерного усилителя с большим (десятки) количеством отражений усиливаемого излучения от АЭ. Рассчитаны варианты обеих схем с наименьшим количеством оптических элементов и учетом паразитной линзы в активном элементе.

6. Разработан ряд компактных импульсно-периодических криогенных дисковых усилителей на монокристаллических Yb:YAG и Yb:YAG/YAG, а также керамических Yb:YAG и Yb:Y₂O₃ средах. Разработаны и изготовлены компактный криогенный дисковый квантрон и криогенная помпа для повышения стабильности работы и увеличения средней мощности усилителей.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы подтверждается полученными в ней оригинальными результатами.

Наиболее значимые из них следующие:

1. Показано, что поведение характеристик Yb:YAG при охлаждении является важным критерием качества материала: чем меньше время жизни на верхнем рабочем уровне и чем меньше рост максимума интенсивности люминесценции при охлаждении до 80 К, тем меньше коэффициент усиления при комнатной и криогенной температурах. Продемонстрировано, что излучение работающих при комнатной температуре Yb:YAG лазеров можно эффективно усиливать в мощных криогенных усилителях на Yb:Y₂O₃ и Yb:Lu₂O₃.

2. Предложен простой метод термодиффузионной сварки оптических элементов при помощи обычной муфельной печи с нагревом в воздушной атмосфере без какого-либо сдавливающего воздействия при высоких температурах.

3. Определены значения трех критериев качества, наиболее часто используемых при количественном описании искажений пучка – интеграл перекрытия χ , число Штреля S и параметр M^2 – для тепловых искажений, самофокусировки и сферических искажений гауссовых и супергауссовых пучков. В перечисленных случаях, выделив неискаженное (входное) поле в искаженном (выходном) поле, можно увеличить интенсивность на оси пучка в фокальной плоскости линзы, хотя полная мощность излучения при этом уменьшится.

4. Показано, что для криогенного дискового иттербиевого лазера оптимальным является использование стретчера на объемных чирпирующих брэгговских решетках и компрессора на дифракционных решетках.

5. Предложены две устойчивые к вибрациям и простые в настройке оптические схемы дискового лазерного усилителя с большим (десятки) количеством проходов усиливаемого излучения через активный элемент. С учетом паразитной линзы в активном элементе рассчитаны варианты обеих схем с наименьшим количеством оптических элементов.

6. Создан W-проходный криогенный усилитель на двух дисковых АЭ из Yb:YAG керамики с выходной энергией 233 мДж в импульсах длительностью 70 нс при частоте повторения 143 Гц. Данные параметры являются лучшими среди созданных на данный момент аналогичных криогенных импульсно-периодических лазерных систем на базе тонких дисков из Yb:YAG керамики.

7. Разработаны компактный криогенный дисковый квантрон и криогенная помпа, с использованием которых создан уникальный многопроходный дисковый усилитель на Yb:Y₂O₃-керамике. Продемонстрирована возможность усиления в нем широкополосного излучения с дальнейшей компрессией в субпикосекундный диапазон длительностей импульсов.

Практическая ценность диссертации

Результаты диссертационной работы могут использоваться для разработки дисковых импульсно-периодических лазерных систем с одновременно высокой средней по времени и пиковой мощностью. Представленный комплекс методов, подходов и сопутствующих технологических решений позволяет выбрать подходящую оптическую схему усиления, систему охлаждения, геометрию и материал активного элемента для создания лазеров с широким спектром выходных параметров.

Результаты работы легли в основу двух патентов: Патент РФ на изобретение №2560438 от 21.07.2015 «Способ соединения деталей оптического элемента из кристаллов гранатов» (Заявка № 2014134017); Патент РФ на изобретение №2607839 от 20.01.2017 «Многопроходный лазерный усилитель на дисковом активном элементе» (Заявка № 2015125271).

Основные положения, выносимые на защиту

1. Значения лазерных характеристик – времени жизни на верхнем рабочем уровне при 80 К и отношения максимальных значений интенсивности люминесценции при 80 К и 300 К – являются важным критерием качества Yb:YAG: чем меньше эти значения, тем ниже эффективность лазерной генерации при комнатной температуре даже при одинаковом времени жизни при 300 К.

2. Излучение Yb:YAG лазеров, работающих при комнатной температуре, может эффективно усиливаться в криогенных усилителях на Yb:Y₂O₃ и Yb:Lu₂O₃ благодаря согласованным спектрам и оптимальным значениям сечения усиления Yb:Y₂O₃ и Yb:Lu₂O₃, обеспечивающим компромисс между большим коэффициентом усиления и большой запасенной энергией.

3. Предложенная многопроходная матричная схема дискового лазерного усилителя за счет переноса изображения с выхода известной телескопической схемы обратно на АЭ позволяет многократно увеличить количество проходов излучения через АЭ или уменьшить размеры зеркал.

4. Для гауссовых и супергауссовых пучков с тремя типами фазовых искажений – тепловая линза, электронная самофокусировка и сферические aberrации – выполняется неравенство: интеграл перекрытия χ больше, чем число Штреля S , а S больше, чем параметр μ , являющийся отношением $(M^2)^2$ пучка без фазовых искажений и с ними. В перечисленных случаях, выделив неискаженное (входное) поле в искаженном (выходном) поле, можно увеличить интенсивность на оси пучка в фокальной плоскости линзы, хотя полная мощность излучения при этом уменьшится.

5. Для стретчирования импульсов до длительности ~ 1 нс в твердотельном иттербиевом лазере с одновременно высокой средней и пиковой мощностью стретчер на базе объемных чирпирующих брэгговских решеток и ком-

прессор на базе диэлектрических дифракционных решеток являются оптимальной парой с точки зрения габаритов, стоимости и простоты юстировки.

6. Высокий вакуум в криогенной камере квантрона не предотвращает появление инея на АЭ, вызванное натеканием воздуха. Возникновения инея можно избежать при помощи подачи небольшого количества газообразного азота.

Апробация работы

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведенных автором в Институте прикладной физики РАН в 2005–2018 годах. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах отделения Нелинейной динамики и оптики, а также на следующих областных, всероссийских и международных конференциях и научных школах: Photonic West. Laser beam control and applications, San Jose. USA, 2006; Десятая научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2006; Одиннадцатая научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2007; 13th International Conference on Laser Optics “LO-2008”, St.Petersburg, Russia, 2008; Двенадцатая научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, Россия, 2008; XIV научная школа "Нелинейные волны-2008", Нижегородская обл., Россия, 2008; XIII Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская обл., Россия, 2008; The 6th International Conference of High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers (HEC-DPSSL), Versailles, France, 2010; 14th International Conference on Laser Optics “LO-2010”, St.Petersburg, Russia, 2010; Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science XXVI (LS) 2010 Rochester, New York, USA, 2010; HiPER WP13-14 Meeting, Versailles, France, 2010; XV Нижегородская сессия молодых ученых, Нижегородская область, Россия, 2010; XV научная школа "Нелинейные волны-2010", Нижегородская обл., Россия, 2010; IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов, Нижегородская обл., Россия, 2010; 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications, Nizhniy Novgorod, Russia, 2012.; 15th International Conference on Laser Optics “LO-2012”, St.Petersburg, Russia, 2012.; SPIE's Optics + Optoelectronics International Symposium, Prague, Czech Republic, 2013; 16th International Conference on Laser Optics “LO-2014”, St.Petersburg, Russia, 2014; The 8th International Conference of High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers (HEC-DPSSL), Oxford, Great Britain, 2014; Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), Munich, Germany, 2015; 17th International Conference on Laser Optics “LO-2016”, St.Petersburg, Russia, 2016; The 21st International Symposium on High Power Laser Systems and Applications, Gmunden, Austria, 2016 ; The OSA Laser Congress (ASSL, LAC), Nagoya, Japan, 2017; Международная конференция по

голографии и прикладным оптическим технологиям, Нижний Новгород, Россия, 2018.

По теме диссертации опубликовано 38 работ, из которых 10 статей в рецензируемых научных журналах из списка ВАК и получено 2 патента РФ.

Личный вклад

Все результаты аналитических исследований, численного моделирования и экспериментов, представленные в диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Общие задачи и основные направления исследований на начальном этапе были поставлены научным руководителем бакалаврской и магистерской дипломных работ Е.А. Хазановым, а в дальнейшем научным руководителем О.В. Палашовым. Решения технических и технологических проблем получены в тесном взаимодействии с И.Б. Мухиным, экспериментальные результаты по усилению лазерного излучения – совместно с И.Б. Мухиным и И.И. Кузнецовым.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего и работы автора. Общий объем диссертации составляет 174 страницы, включая 74 рисунка и 3 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 205 источников, включая 38 авторских работ.

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 последовательному экспериментальному и теоретическому исследованию ключевых задач для построения мощных дисковых лазеров: от выбора материала АЭ до оценки качества выходного излучения. Основные результаты главы представлены в работах [А2, А6, А8, А9, А11-А15, А24, А25, А27, А30, А33-А35, А38].

В первом разделе первой главы приведены результаты измерений основных лазерных характеристик кристаллов Yb:YAG, а также керамических полупроводниковых оксидов Yb:Y₂O₃, Yb:Lu₂O₃ и Yb:Sc₂O₃ в диапазоне температур 80÷300 К. Схема эксперимента по одновременному измерению спектра люминесценции и времени жизни на верхнем рабочем уровне представлена на рисунке 1.

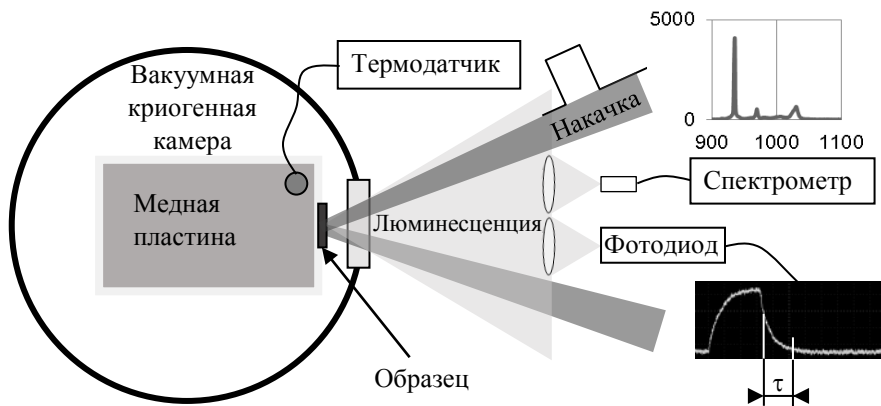


Рис. 1. Схема измерения спектра люминесценции и времени жизни на верхнем рабочем уровне в зависимости от температуры.

Образец припаивался к медной пластине, помещенной в криостат. Криостат представлял собой вакуумную камеру с охлаждаемым жидким азотом сосудом, который имеет непосредственный тепловой контакт с исследуемым образцом. На кристалл через оптическое окно направлялось импульсное излучение накачки на длине волны ~ 938 нм. Часть излучаемой люминесценции фокусировалась линзой в волокно спектрометра, еще часть – в фотодиод, и полученная зависимость мощности излучения от времени регистрировалась с помощью осциллографа. Часть зависимости, полученная после выключения накачки, аппроксимируется экспоненциальной кривой, откуда находится время жизни на верхнем рабочем уровне лазерного перехода τ . Согласно результатам измерений поведение характеристик Yb:YAG при охлаждении является важным критерием качества материала: чем меньше время жизни на верхнем рабочем уровне и чем меньше рост максимума интенсивности люминесценции при охлаждении до 80 К, тем меньше коэффициент усиления при комнатной и криогенной температурах. При увеличении легирования кристалла Yb:YAG, начиная с некоторого значения, наблюдается значительное ухудшение качества среды. Центральная длина волны усиления λ_{max} Yb:YAG при 300 К очень близка к центральной длине волны усиления Yb:Y₂O₃ и Yb:Lu₂O₃ при 80 К, поэтому излучение работающих при комнатной температуре Yb:YAG лазеров можно эффективно усиливать в мощных криогенных усилителях на Yb:Y₂O₃ и Yb:Lu₂O₃.

Во втором разделе первой главы описан метод термодиффузионной сварки кристаллов различных гранатов. Такие композитные оптические элементы широко применяются в лазерах и других оптических устройствах. Так, использование кладдинга позволяет подавить паразитную генерацию в активных элементах. Широко используются дисковые АЭ с приваренной к торцу

нелегированной частью для уменьшения тепловых искажений и ослабления эффекта усиленного спонтанного излучения. Создание многослойной структуры с легированием, переменным вдоль направления излучения, позволяет управлять распределением тепла внутри АЭ. Принцип работы микрочип-лазеров подразумевает монолитную композитную структуру АЭ. Сращивание вдоль боковой поверхности позволяет увеличивать апертуру оптического элемента. Создание композитного оптического элемента на базе двух сред с близкими, но различными спектрами позволяет увеличить полосу усиления АЭ. Приваривая кристалл YAG к торцу магнитооптического элемента (МОЭ) из TGG, можно значительно уменьшить термонаведенные искажения излучения в изоляторе Фарадея при высокой средней мощности проходящего излучения за счет высокой теплопроводности YAG. Основными преимуществами метода являются простота и дешевизна: занижены требования к качеству поверхности, достаточно муфельной печи с нагревом в воздушной атмосфере без какого-либо сдавливающего воздействия при высоких температурах. Метод позволил получить композиты из кристаллов YAG, Yb:YAG, Yb:GGG, TGG апертурой до 20 мм с оптическим контактом, механическая прочность которого сравнима с прочностью монокристалла, а коэффициент отражения от границы близок к френелевскому.

В третьем разделе первой главы предложены две оптические схемы многопроходного дискового лазерного усилителя с большим (несколько десятков) количеством отражений усиливаемого излучения от активного элемента. Использование данных схем позволяет компенсировать один из основных недостатков дисковых активных элементов – небольшой относительно стержневой геометрии коэффициент усиления излучения за один проход. Для построения схем необходима правильная юстировка двух оптических систем, переносящих изображение с АЭ обратно на него же с сохранением размера пучка и расходимости, заданной паразитной линзой в АЭ. Схемы названы матричными из-за расположения друг под другом мест отражения лазерного излучения на больших зеркалах телескопов в виде таблицы или матрицы. Предложенные схемы отличаются порядком обхода излучением усилителя. Обе схемы имеют свои особенности при настройке, и выбор в большей степени зависит от удобства применения при решении конкретной задачи. При прочих равных, второй вариант дает возможность организовать большее число проходов излучения через АЭ. Данные схемы позволяют полностью задействовать апертуры больших зеркал одной из оптических систем. Благодаря этому появляется возможность, в зависимости от задачи, увеличить количество проходов через АЭ в усилителе либо уменьшить размеры зеркал. С учетом линзы в активном элементе рассчитаны варианты обих схем с наименьшим количеством оптических элементов. Предложена модификация схемы для случая сильной положительной линзы в АЭ. Проведены первые эксперименты по созданию дискового усилителя на базе предложенной матричной схемы. Настроив схему на 32 отражения излучения от композитного

Уб:YAG/YAG АЭ получено усиление слабого сигнала 1,26 раза за проход. При средней мощности входного излучения ~9 Вт на выходе получено ~80 Вт при частоте повторения 10 кГц импульсов длительностью 2 нс. Эффективность по накачке при этом составила ~20%.

В четвертом разделе первой главы проведен сравнительный анализ трех наиболее часто используемых при количественном описании искажений пучка критериев качества – интеграл перекрытия χ , число Штреля S и M^2 – в случае тепловых искажений, самофокусировки и сферических искажений гауссовых и супергауссовых пучков. χ характеризует долю мощности неискаженного (входного) поля в искаженном (выходном) поле, S показывает уменьшение интенсивности на оси пучка в фокальной плоскости, а M^2 показывает, во сколько раз расходимость реального пучка превышает расходимость гауссова пучка, если они имеют одинаковый эффективный радиус в перетяжке. Для сравнения значения M_{in}^2 для неискаженного и M_{out}^2 для искаженного пучков введен параметр μ , равный квадрату их отношения. Без компенсации искажений удалось установить лишь одну общую для всех трех типов искажений закономерность, справедливую для гауссовых и супергауссовых пучков: интеграл перекрытия χ больше числа Штреля S .

Интеграл перекрытия χ и число Штреля S во многих случаях можно увеличить с помощью обычной линзы, поэтому имеет смысл сравнивать именно улучшенные (максимизированные) значения. В работе показано, что фокусное расстояние компенсирующей линзы можно довольно точно посчитать по приближенным аналитическим формулам. Поведение этих двух параметров очень схоже. В частности, интеграл перекрытия и число Штреля уменьшаются при увеличении искажений и одинаково меняются в зависимости от формы пучка. Тем не менее, какого-то простого и однозначного соответствия для их количественного сравнения найти не удалось. Параметр μ не подходит для описания П-образного пучка и его поведение при изменении m отличается от поведения других двух критериев. Причиной является рост параметра M^2 для больших m , причем для П-образного пучка $M^2 \rightarrow \infty$, что говорит о его нефизичности в этом случае.

Максимизированный интеграл перекрытия χ всегда больше, чем число Штреля S , а S всегда больше, чем μ для гауссовых и супергауссовых пучков и трех типов фазовых искажений: тепловая линза, электронная самофокусировка и сферические аберрации. Другими словами, интеграл перекрытия – самый мягкий критерий, а μ – самый жесткий. Из сравнения критериев χ , S , μ следует еще один интересный результат: выделив неискаженное (входное) поле в искаженном (выходном) поле, можно увеличить интенсивность на оси пучка в фокальной плоскости линзы, хотя полная мощность излучения при этом уменьшится. Данное утверждение верно как при компенсации искажений, так и без нее для всех рассмотренных типов фазовых аберраций и профилей пучка.

Вторая глава посвящена работам по созданию криогенного дискового лазера с высокой средней и пиковой мощностью как на базе традиционной среды Yb:YAG, так и с применением перспективной Yb:Y₂O₃ керамики. Описываются возникающие проблемы и пути их решения, а также приводятся параметры выходного излучения, полученного на различных стадиях развития установки. Основные результаты главы представлены в работах [A1, A3-A5, A7, A10, A12, A16-A23, A25, A26, A28, A29, A31-A37].

В первом разделе второй главы проведено теоретическое исследование основных параметров двухпроходного криогенного дискового Yb:YAG усилителя при различной частоте повторения и скважности диодной накачки. Получен набор приближенных решений системы дифференциальных уравнений для 4-уровневой схемы, на которую падает монохроматическая накачка. Найдены области значений параметров, в которых справедливы те или иные решения. Наиболее интересным представляется решение с частичным учетом эффекта насыщения, хорошо совпадающее с точным численным решением. Полученные формулы позволяют оценить оптимальное легирование Yb. Для кристалла толщиной 600 мкм оптимальным является легирование 10 at%. Проведен учет контура линии поглощения и спектра накачки (формы, ширины, центральной частоты).

Второй раздел второй главы посвящен расчету параметров стретчера и компрессора для криогенного дискового Yb:YAG лазера и выбору оптимальных вариантов их реализации. Согласно экспериментам в криогенных каскадах, без искажений усиливаются импульсы с шириной спектра ~ 0,7 нм по полувысоте, что соответствует спектрально-ограниченному импульсу длительностью ~2 пс. Для того чтобы импульс с таким узким спектром растянуть во времени до запланированной длительности 1 нс, а затем сжать до единиц пикосекунд, необходима большая дисперсия групповой скорости, что сильно сужает набор подходящих для стретчера и компрессора оптических элементов. Для построения стретчера подходят как голографические ДР, так и объемные чирпирующие брэгговские решетки (ОЧБР) за счет своей большой дисперсии. В процессе выполнения работы написан программный код для расчета пары стретчер-компрессор на базе ДР. Проведено моделирование хода лучей в одно- и двухрешеточном стретчере и компрессоре и вычисление габаритов и фокусных расстояний необходимых оптических элементов. Рассчитана и экспериментально реализована схема стретчера на ДР 1200 штрихов/мм. Согласно расчетам, для построения более оптимальных с точки зрения пропускания, размеров и стоимости стретчера и компрессора на базе ДР необходимо использовать решетки 1740 штрихов/мм.

Экспериментально реализован стретчер на базе двух ОЧБР с четырьмя отражениями от каждой. Полученная схема значительно компактнее предыдущей и проще в юстировке. Использование компрессора на базе ОЧБР на выходе импульсно-периодического лазера с высокой средней мощностью весьма затруднительно из-за опасности перегрева и оптического пробоя. На

сегодняшний день для реализации CPA схемы криогенного дискового Yb:YAG лазера оптимальным представляется использование пары стретчер на ОЧБР и компрессор на ДР с подстройкой дисперсии.

В третьем разделе второй главы исследуются проблемы, связанные с криогенным охлаждением, а также приводятся результаты, достигнутые при создании мощного криогенного дискового лазера на кристаллах Yb:YAG. Исследован эффект усиленного спонтанного излучения (УСИ) в АЭ из Yb:YAG различной геометрии: тонкий диск, тонкий диск со скошенной боковой поверхностью (в том числе с поглощающим покрытием на образующей) и композитный Yb:YAG / YAG АЭ (рисунок 2).

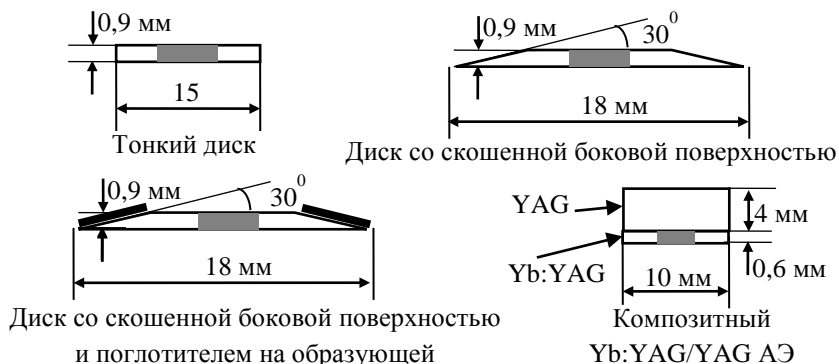


Рис. 2. Различные геометрии АЭ. Серым цветом обозначена область накачки: 6 мм в трех первых геометриях и 4 мм в композитном Yb:YAG/YAG АЭ. Черным цветом обозначена боковая поверхность кристалла, покрытая поглотителем.

Ниже всего порог паразитной генерации в АЭ дисковой геометрии. В дисках со скошенной боковой поверхностью порог существенно выше, однако при больших интенсивностях накачки, даже после покрытия образующей поглотителем, отражение спонтанного излучения от боковой поверхности назад в область накачки оказывает большое влияние на запасенную энергию. В композитном АЭ эффект УСИ существенно слабее, чем во всех остальных исследованных геометриях.

Важную роль при создании криогенных лазеров играет герметичность вакуумных криостатов. Наличие небольших натеканий внутрь объема с АЭ даже при условии глубокого вакуума приводит к появлению инея на АЭ и, как следствие, увеличению интенсивности отраженного от просветляющего покрытия излучения, а также к снижению порога пробоя просветляющего покрытия. Одним из альтернативных способов решения проблемы с образованием инея является создание небольшого потока газообразного азота внутри вакуумной криогенной камеры, однако это существенное технологическое усложнение установки.

Создана и опробована оригинальная проточная система охлаждения жидким азотом при помощи погружного насоса, позволившая работать с диодной накачкой в непрерывном режиме. Используя W-проходный ОУ на базе заливного криостата с проточной системой охлаждения, на выходе лазера получено 120 мДж при частоте повторения 500 Гц и 145 мДж при частоте 400 Гц. Для повышения стабильности работы и средней мощности ОУ разработан компактный криогенный дисковый квантрон с апертурой АЭ 20 мм. Для создания проточной системы охлаждения данных квантронов была разработана и изготовлена криогенная помпа с датчиками контроля скорости потока, давления и уровня жидкого азота. В сочетании с телескопической схемой усиления, усилитель с двумя такими квантронами позволяет значительно улучшить согласование между пучками сигнала и накачки на кристаллах, компенсировать тепловую линзу и организовать необходимое количество проходов сигнала через кристалл. Результаты первых экспериментов показали улучшение качества пучка и стабильную работу ОУ при мощности непрерывной накачки до 0,6 кВт/АЭ. Запасенная энергия ограничена появлением паразитной генерации поперек АЭ. Для решения данной проблемы планируется изготовить АЭ с кладдингом по периметру.

Четвертый раздел второй главы посвящен применению иттербиевой лазерной керамики для создания мощных дисковых криогенных лазеров. Используя 2 дисковых АЭ из Yb:YAG керамики диаметром 20 мм, толщиной 1,4 мм и легированием 5 ат%, удалось получить 233 мДж в импульсах длительностью 70 пс при частоте повторения 143 Гц на выходе W-проходного криогенного усилителя. Эффективность по накачке составила при этом 20%, что является достаточно высоким значением для импульсно-периодических лазеров. Обзор имеющихся открытых источников показал, что данные выходные параметры являются наилучшими среди созданных на сегодняшний день криогенных импульсно-периодических лазерных систем на базе тонких дисков из Yb:YAG керамики.

Впервые создан многопроходный дисковый импульсно-периодический усилитель на базе керамического Yb:Y₂O₃ АЭ с криогенным охлаждением. Выходная мощность составила 15,8 Вт при частоте повторения 11,5 кГц длительности импульсов 0,5 нс (рисунок 3, а). Были также измерены спектры входного и выходного сигналов (рисунок 3, б). Их полное совпадение при ширине ~1,2 нм говорит о хорошем согласовании центральной длины волны задающей системы на базе Yb:YAG и длины волны с максимальным сечением усиления охлажденного до криогенной температуры Yb:Y₂O₃. При наличии соответствующего источника возможно усиление более широкополосного излучения с дальнейшей компрессией в субпикосекундный диапазон длительностей импульсов.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в ходе выполнения работы, а также обсуждаются перспективы их дальнейшего применения.

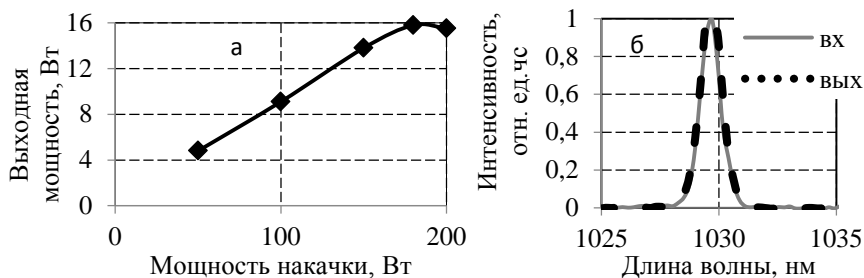


Рис. 3. (а) Зависимость выходной мощности 18-ти проходного дискового криогенного $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ усилителя от мощности накачки. (б) Зависимость спектра входного (сплошная линия) и выходного (пунктирная линия) излучения дискового криогенного $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ усилителя от длины волны.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Измерены спектральные и лазерные характеристики Yb:YAG и полупроводниковых оксидов $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$, $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb:Sc}_2\text{O}_3$ в диапазоне температур 80–300 К. Центральная длина волны усиления λ_{max} Yb:YAG при 300 К очень близка к центральной длине волны усиления $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$ при 80 К, поэтому излучение работающих при комнатной температуре Yb:YAG лазеров можно эффективно усиливать в мощных криогенных усилителях на $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb:Lu}_2\text{O}_3$. Впервые создан многопроходный криогенный дисковый усилитель на $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$. Средняя выходная мощность составила 15,8 Вт при частоте повторения 11,5 кГц, длительности импульсов 0,5 нс и ширине спектра 1,2 нм. Полученные результаты демонстрируют возможность усиления широкополосного излучения с дальнейшей компрессией в субпикосекундный диапазон длительностей импульсов.

2. Поведение характеристик Yb:YAG при охлаждении является важным критерием качества материала: чем меньше время жизни на верхнем рабочем уровне и чем меньше рост максимума интенсивности люминесценции при охлаждении до 80 К, тем меньше коэффициент усиления при комнатной и криогенной температурах. При увеличении легирования кристалла Yb:YAG , начиная с некоторого значения, наблюдается значительное ухудшение качества среды.

3. Предложен простой метод термодиффузионной сварки оптических элементов при помощи обычной муфельной печи с нагревом в воздушной атмосфере без какого-либо сдавливающего воздействия при высоких температурах. Проведена успешная апробация на целом ряде гранатов (YAG , GGG , TGG). Показано, что механическая прочность контакта не хуже, чем у материала свариваемых образцов, а коэффициент отражения от границы близок к френелевскому.

4. Проведен сравнительный анализ трех наиболее часто используемых при количественном описании искажений пучка критериев качества – интеграл перекрытия χ , число Штреля S и M^2 – на примере тепловых искажений, самофокусировки и сферических искажений гауссовых и супергауссовых пучков. В рассмотренных случаях χ больше S , а S больше, чем параметр μ , являющийся отношением $(M^2)^2$ пучка без фазовых искажений и с ними. В перечисленных случаях, выделив неискаженное (входное) поле в искаженном (выходном) поле, можно увеличить интенсивность на оси пучка в фокальной плоскости линзы, хотя полная мощность излучения при этом уменьшится. Поведение параметра μ при изменении степени супергауссова пучка m отличается от поведения других двух критериев. Причиной является рост параметра M^2 для больших m , причем для П-образного пучка $M^2 \rightarrow \infty$, что говорит о его нефизичности в этом случае.

5. Проведено сравнение стретчеров и компрессоров на базе ДР (дифракционных решеток) и ОЧБР (объемных чирпирующих брэгговских решеток) в криогенном дисковом иттербиевом лазере. Создан программный код для расчета пары стретчер-компрессор на базе ДР. Рассчитана и экспериментально реализована схема стретчера на ДР 1200 штрихов/мм и показано, что более оптимально использовать решетки 1740 штрихов/мм. Экспериментально реализован компактный и простой в юстировке стретчер на базе двух ОЧБР с четырьмя отражениями от каждой. Показано, что для криогенного дискового иттербиевого лазера оптимальным является использование стретчера на ОЧБР и компрессора на ДР.

6. Предложены две новые оптические схемы многопроходного дискового лазерного усилителя, названные матричными из-за расположения мест отражения лазерного излучения на больших зеркалах телескопов в виде таблицы или матрицы. С учетом паразитной линзы в активном элементе рассчитаны варианты обеих схем с наименьшим количеством оптических элементов. При 32 отражениях излучения от АЭ на выходе собранного по одной из схем усилителя экспериментально получено ~80 Вт средней мощности с КПД по накачке ~20% при частоте повторения 10 кГц импульсов длительностью 2 нс.

7. Созданы W-проходные криогенные усилители:

- на двух дисковых АЭ из Yb:YAG керамики с выходной энергией 233 мДж в импульсах длительностью 70 нс при частоте повторения 143 Гц. Данные параметры являются лучшими среди созданных на данный момент аналогичных криогенных импульсно-периодических лазерных систем на базе тонких дисков из Yb:YAG керамики;
- на двух дисковых композитных монокристаллических Yb:YAG/YAG АЭ с проточной системой криогенного охлаждения и выходной энергией 120 мДж при частоте повторения 500 Гц. Разработаны и изготовлены новый криогенный дисковый квантрон и криогенная помпа

для повышения стабильности работы и увеличения средней мощности усилителей.

Цитируемая литература

- [1] <http://www.hilase.cz/>.
- [2] *Y. Deng, A. Schwarz, H. Fattahi, M. Ueffing, X. Gu, M. Ossiander, T. Metzger, V. Pervak, H. Ishizuki, T. Taira, T. Kobayashi, G. Marcus, F. Krausz, R. Kienberger, N. Karpowicz* Carrier-envelope-phase-stable, 1.2 mJ, 1.5 cycle laser pulses at 2.1 μm // *Optics Letters*. - 2012. - Vol.37. - №23. - P.4973-4975.
- [3] *K.-H. Hong, S.-W. Huang, J. Moses, X. Fu, C.-J. Lai, G. Cirmi, A. Sell, E. Granados, P. Keathley, F. X. Kärtner* High-energy, phase-stable, ultrabroadband kHz OPCPA at 2.1 μm pumped by a picosecond cryogenic Yb:YAG laser // *Optics Express*. - 2011. - Vol.19. - №16. - P.15538-15548.
- [4] *W. S. Graves, J. Bessuille, P. Brown, S. Carbajo, V. Dolgashev, K. H. Hong, E. Ihloff, B. Khaykovich, H. Lin, K. Murari, E. A. Nanni, G. Resta, S. Tantawi, L. E. Zapata, F. X. Kärtner, D. E. Moncton* Compact x-ray source based on burst-mode inverse Compton scattering at 100 kHz // *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*. - 2014. - Vol.17. - №12. - P.120701.
- [5] *C.-L. Chang, P. Krogen, H. Liang, G. J. Stein, J. Moses, C.-J. Lai, J. P. Siqueira, L. E. Zapata, F. X. Kärtner, K.-H. Hong* Multi-mJ, kHz, ps deep-ultraviolet source // *Optics Letters*. - 2015. - Vol.40. - №4. - P.665-668.
- [6] *S. Hädrich, A. Klenke, J. Rothhardt, M. Krebs, A. Hoffmann, O. Pronin, V. Pervak, J. Limpert, A. Tünnemann* High photon flux table-top coherent extreme-ultraviolet source // *Nature Photonics*. - 2014. - Vol.8. - P.779.
- [7] *V. Petrov* Parametric down-conversion devices: The coverage of the mid-infrared spectral range by solid-state laser sources // *Optical Materials*. - 2012. - Vol.34. - №3. - P.536-554.
- [8] *Y. Ochi, K. Nagashima, M. Maruyama, M. Tsubouchi, F. Yoshida, N. Kohno, M. Mori, A. Sugiyama* Yb:YAG thin-disk chirped pulse amplification laser system for intense terahertz pulse generation // *Optics Express*. - 2015. - Vol.23. - №11. - P.15057-15064.
- [9] *J. W. Dawson, J. K. Crane, M. J. Messerly, M. A. Prantil, P. H. Pax, A. K. Sridharan, G. S. Allen, D. R. Drachenberg, H. H. Phan, J. E. Heebner, C. A. Ebbers, R. J. Beach, E. P. Hartouni, C. W. Siders, T. M. Spinka, C. P. J. Barty, A. J. Bayramian, L. C. Haefner, F. Albert, W. H. Lowdermilk, A. M. Rubenchik, R. E. Bonanno* High average power lasers for future particle accelerators // *AIP Conference Proceedings*. - 2012. - Vol.1507. - №1. - P.147-153.
- [10] *T. Y. Fan, J. L. Daneu* Thermal coefficients of the optical path length and refractive index in YAG // *Applied Optics*. - 1998. - Vol.37. - №9. - P.1635-1637.

- [11] *G. L. Bourdet, H. Yu* Longitudinal temperature distribution in an end-pumped solid-state amplifier medium: application to a high average power diode pumped Yb:YAG thin disk amplifier // *Applied Optics*. - 2007. - Vol.46. - №23. - P.6033-6041.
- [12] *D. C. Brown* Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 1998. - Vol.34. - №12. - P.2383-2392.
- [13] *J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, F. Gan* Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet // *Journal of the Optical Society of America B*, . - 2003. - Vol.20. - №9. - P.1975-1979.
- [14] *D. C. Brown, R. L. Cone, Y. Sun, R. W. Equall* Yb:YAG absorption at ambient and cryogenic temperatures // *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*. - 2005. - Vol.11. - №3. - P.604-612.
- [15] *W. Leemans, E. Esarey* Laser-driven plasma-wave electron accelerators // *Physics Today*. - 2009. - Vol.62. - №3. - P.44-49.
- [16] *A.-L. Calendron, J. Meier, M. Hemmer, L. E. Zapata, F. Reichert, H. Cankaya, D. N. Schimpf, Y. Hua, G. Chang, A. Kalaydzhyan, A. Fallahi, N. H. Matlis, F. X. Kärtner* Laser system design for table-top X-ray light source // *High Power Laser Science and Engineering*. - 2018. - Vol.6. - P.e12.
- [17] *S. Klingebiel, C. Wandt, C. Skrobol, I. Ahmad, S. A. Trushin, Z. Major, F. Krausz, S. Karsch* High energy picosecond Yb:YAG CPA system at 10 Hz repetition rate for pumping optical parametric amplifiers // *Optics Express*. - 2011. - Vol.19. - №6. - P.5357-5363.
- [18] *D. C. Brown, S. Tornegård, K. Kowalewski, V. Envid, J. Zembek* High average power-high peak power cryogenic Yb:YAG lasers for pumping Ti:Sapphire and OPCPA ultrafast lasers // *SPIE Defense, Security, and Sensing*, - 2012. - 11.
- [19] *A. Ikesue, I. Furusato, K. Kamata* Fabrication of polycrystalline, transparent YAG ceramics by a solid-state reaction method // *Journal of the American Ceramic Society*. - 1995. - Vol.78. - №1. - P.225-228.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

- 1.А. *Е. А. Перевезенцев, Мухин И.Б., О. В. Палашов, Е. А. Хазанов* Усиление лазерного излучения в дисках из YAG:Yb, охлажденных до температуры жидкого азота // *Квантовая электроника*. - 2009. - Т.39. - №9. - С. 807-813.
- 2.А. *И. Б. Мухин, О. В. Палашов, Е. А. Хазанов, А. Г. Вяткин, Е. А. Перевезенцев* Лазерные и тепловые характеристики кристалла Yb:YAG в диапазоне температур 80-300 К // *Квантовая электроника*. - 2011. - Т.41. - С.1045.
- 3.А. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин, И. И. Кузнецов, О. В. Палашов, Е. А. Хазанов.* Криогенный дисковый Yb:YAG-лазер с энергией 120 мДж при

- частоте повторения 500 Гц // Квантовая электроника. - 2013. - Т.43. - №3. - С.207-210.
- 4.A. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин, И. И. Кузнецов, О. Л. Вадимова, О. В. Палашов* Криогенный дисковый Yb:YAG-лазер с выходным импульсом наносекундной длительности // Квантовая электроника. - 2014. - Т.44. - №5. - С.448-451.
- 5.A. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин, И. И. Кузнецов, О. Л. Вадимова, О. В. Палашов* Задающая система криогенного дискового Yb:YAG-лазера // Квантовая электроника. - 2015. - Т.45. - №5. - С.451-454.
- 6.A. *Е. А. Perevezentsev, A.K. Poteomkin, E. A. Khazanov* Comparison for phase aberrated laser beams quality criteria // Applied Optics. - 2007. - Vol.46. - №5. - P.774-784.
- 7.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov, E. A. Khazanov, D. Luo, J. Zhang, D. Tang* Yb:YAG ceramics application for high energy cryogenic disk amplifier development // Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science. - 2013. - Vol.210. - №6. - P.1232-1234.
- 8.A. *I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, O. V. Palashov* Fabrication of composite laser elements by a new thermal diffusion bonding method // Optical Materials Express. - 2014. - Vol.4. - №2. - P.266-271.
- 9.A. *E. A. Perevezentsev, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. V. Palashov* Matrix multi-pass scheme disk amplifier // Applied Optics. - 2017. - Vol.56. - №30. - P.8471-8476.
- 10.A. *E. A. Perevezentsev, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, M. R. Volkov, O. V. Palashov* Multipass cryogenic Yb:Y₂O₃ ceramic disk amplifier // Applied Physics B. - 2019. - 125: 141, <https://doi.org/10.1007/s00340-019-7254-4>
- 11.A. *E. A. Perevezentsev, A.K. Poteomkin, E. A. Khazanov* Comparison of laser beam quality criteria presented // Proc. SPIE. - 2006. - Vol.6101. - P.610119.
- 12.A. *I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, A. G. Vyatkin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* One kilohertz cryogenic disk laser with high average power // Proc. SPIE. - 2011. - Vol.8080. - P.80800B.
- 13.A. *И. Б. Мухин, О. В. Палашов, Е. А. Перевезенцев.* Способ соединения деталей оптического элемента из кристаллов гранатов : Патент РФ № 2560438, приоритет от 21.07.2015.
- 14.A. *О. В. Палашов, И. Б. Мухин, Е. А. Перевезенцев.* Многопроходный лазерный усилитель на дисковом активном элементе : Патент РФ № 2607839, приоритет от 20.01.2017.
- 15.A. *Е. А. Перевезенцев, А. К. Потемкин, Е. А. Хазанов.* Сравнение критериев качества лазерных пучков // X Научная конференция по радиофизике. - 2006, Нижний Новгород, Россия.
- 16.A. *Е. А. Перевезенцев* Расчет параметров мощного дискового Yb: YAG лазерного усилителя с диодной накачкой // XI Научная конференция по радиофизике. - 2007, Нижний Новгород, Россия.

- 17.A. *Е. А. Перевезенцев* Использование дисковых активных элементов Yb:YAG в криогенных лазерах // XII Научная конференция по радиофизике. - 2008, Нижний Новгород, Россия.
- 18.A. *Е. А. Перевезенцев* Оптимизация мощного лазерного усилителя на Yb:YAG с диодной накачкой // XIV научная школа "Нелинейные волны-2008". - 2008, Нижний Новгород, Россия.
- 19.A. *Е. А. Перевезенцев* Расчет мощного Yb:YAG лазерного усилителя с диодной накачкой // XIII Нижегородская сессия молодых ученых. - 2008, Нижний Новгород.
- 20.A. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин* Криогенный дисковый Yb:YAG лазер с высокой средней и пиковой мощностью // XV Нижегородская сессия молодых ученых. - 2010, Нижний Новгород, Россия.
- 21.A. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин* Мощный дисковый криогенный Yb:YAG лазер с диодной накачкой // XV научная школа "Нелинейные волны-2010". - 2010, Нижний Новгород, Россия.
- 22.A. *Е. А. Перевезенцев, И. Б. Мухин* Особенности генерации и усиления лазерного излучения охлаждаемыми Yb:YAG дисками // IV Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов. - 2010, Нижний Новгород, Россия.
- 23.A. *Е. А. Перевезенцев, И. И. Кузнецов, И. Б. Мухин, Д. Е. Силин, М. Р. Волков, О. В. Палашов* Применение фазово-сдвиговой интерферометрии для измерения параметров оптических сред // Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям. -2018, Нижний Новгород, Россия.
- 24.A. *Е. А. Perevezentsev, I. V. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Laser amplification in disk Yb:YAG crystal cooled to the liquid nitrogen temperature // 13th International Conference on Laser Optics "LO-2008". - 2008, St.Petersburg, Russia.
- 25.A. *Е. А. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Sub-Joule diode-pumped cryogenic Yb:YAG disk laser at high repetition rate // The 6th International Conference of High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers (HEC-DPSSL). - 2010. -, Versailles, France.
- 26.A. *Е. А. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Particularities of generation and amplification in cryogenically cooled Yb:YAG disks // 14th International Conference on Laser Optics "LO-2010". - 2010, St. Petersburg, Russia.
- 27.A. *Е. А. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Experimental and theoretical studying of generation and amplification in Yb:YAG disc crystals // Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science XXVI (LS) 2010. - 2010, Rochester, New York, USA.
- 28.A. *Е. А. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Development of a DPSS cryogenic Yb:YAG disk laser in the IAP RAS // HiPER WP13-14 Meeting. - 2010, Versailles, France.

- 29.A. *V. V. Zelenogorsky, E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov* Optical properties of oxide ceramics // 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications. - 2012, Nizhny Novgorod, Russia.
- 30.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Amplifier with high energy capacity and average power based on cryogenically cooled disk shaped Yb:YAG laser ceramics // 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications. - 2012, Nizhny Novgorod, Russia.
- 31.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. L. Vadimova, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* Sub-Joule level cryogenic disk laser based on Yb:YAG ceramics // 15th International Conference on Laser Optics "LO-2012. - 2012, St. Petersburg, Russia.
- 32.A. *I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, O. L. Vadimova, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov, E. A. Khazanov* 233 mJ 143 Hz Yb:YAG ceramic cryogenic disk laser presented // SPIE's 2013 Optics + Optoelectronics International Symposium. - 2013, Prague, Czech Republic.
- 33.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, I. I. Kuznetsov, O. L. Vadimova* High power cryogenic Yb:YAG disk laser with nanosecond output pulse duration // 16th International Conference on Laser Optics "LO-2014". - 2014, St. Petersburg, Russia.
- 34.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, I. I. Kuznetsov, O. L. Vadimova* Nanosecond Cryogenic Disk Laser for Stretched Picosecond Pulse Amplification // The 8th International Conference of High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers (HEC-DPSSL). - 2014, Oxford, Great Britain.
- 35.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. V. Palashov* High power kHz cryogenic Yb:YAG CPA laser system // Conference on Lasers & Electro-Optics / Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC). - 2015, Munich, Germany.
- 36.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, O. V. Palashov* High power CPA cryogenic Yb:YAG laser // 17th International Conference on Laser Optics "LO-2016". - 2016, St. Petersburg, Russia.
- 37.A. *E. A. Perevezentsev, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, O. L. Vadimova, O. V. Palashov* Application of composite Yb:YAG/YAG active elements for high power laser systems // The 21st International Symposium on High Power Laser Systems and Applications. - 2016, Gmunden, Austria.
- 38.A. *E. Perevezentsev, I. Kuznetsov, I. Mukhin, O. Palashov* New Optical Scheme for a Multi-Pass Disk Laser Amplifier // The OSA Laser Congress (ASSL, LAC), OSA Technical Digest. - 2017, Nagoya, Japan.

Оглавление диссертации

Введение	3
Глава 1. Особенности создания мощных дисковых лазеров на иттербиевых средах	20
1.1. Спектральные и лазерные характеристики YAG, Y ₂ O ₃ , Lu ₂ O ₃ , Sc ₂ O ₃ , легированных ионом Yb ³⁺	21
1.2. Композитные активные элементы	34
1.3. Многопроходная схема для дисковых усилителей	42
1.4. Критерии качества лазерного излучения	56
Заключение к главе 1	79
Глава 2. Криогенное охлаждение дисковых активных элементов	82
2.1. Коэффициент усиления и запасенная энергия в криогенных дисковых Yb:YAG элементах	84
2.2. Система стретчер-компрессор для криогенного Yb:YAG лазера	96
2.3. Криогенный дисковый лазер на кристаллах Yb:YAG	111
2.4. Иттербиевая керамика для мощных криогенных дисковых лазеров	133
Заключение к главе 2	145
Заключение	148
Список работ по теме диссертации	153
Список использованной литературы и ссылки	158

ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Евгений Александрович

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ ДИСКОВЫХ
ЛАЗЕРОВ НА ИТТЕРБИЕВЫХ СРЕДАХ
С КРИОГЕННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ**

А в т о р е ф е р а т

Подписано к печати 16.07.2019 г.
Формат 60×90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,5.
Тираж 100 экз. Заказ № 59(2019).

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