

## УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки  
Института лазерной физики Сибирского  
отделения  
Российской академии наук  
(ИЛФ СО РАН)  
д.ф.-м.н. И.Ф. Шайхисламов



« 06 » сентября 2023 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук  
на диссертацию в виде научного доклада **Мухина Ивана Борисовича «Оптимизация и применение иттербиевых лазеров для формирования фемтосекундного излучения с высокой пиковой и средней мощностью»**, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.3.19 — лазерная физика.

Диссертационная работа в виде научного доклада Мухина Ивана Борисовича посвящена развитию методов исследований материалов, активированных ионами иттербия, созданию на их основе лазеров с высокой пиковой и средней мощностью, преобразованию излучения иттербиевых лазеров в фемтосекундный диапазон длительностей и их применению для генерации и усиления фемтосекундного излучения с высокой пиковой и средней мощностью.

### **Актуальность темы**

Повышение одновременно средней и пиковой мощности лазерного излучения является одним из важных направлений развития лазерной физики. Одним из наиболее перспективных направлений одновременного увеличения как средней, так и пиковой мощности является использование иттербиевых лазерных сред в сочетании с диодной накачкой. При этом для обеспечения высокой эффективности генерации и усиления лазерных импульсов одну из определяющих ролей играет оптическое качество активной среды. Поэтому актуальной является как задача диагностики лазерных материалов, так и

исследование способов изготовления широкоапертурных активных элементов с высокими теплофизическими и лазерными характеристиками.

Сочетание технологий изготовления иттербиевых дисковых активных элементов (в том числе, керамических) с криогенным охлаждением и мощной диодной накачкой позволяют на сегодняшний день создавать лазерные установки киловаттного уровня средней мощности с энергией импульса в единицы и десятки джоулей.

Кроме того, различные методы и подходы к способам нелинейного временного растяжения и сжатия импульсов, а также нелинейное преобразование излучения иттербиевых лазеров в излучение суперконтинуума имеют свои, связанные с масштабированием, ограничения, и исследования в данном направлении по-прежнему остаются актуальными.

Применение иттербиевых лазеров с высокой средней мощностью в создании фемтосекундных источников излучения, в том числе в уникальных малоцикловых фс высокоинтенсивных крупномасштабных лазерных установках мирового уровня становится все более актуальным.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертация в виде научного доклада состоит из введения, основного содержания работы, состоящего из четырех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований и списка литературы квинтилей Q1 и Q2, в которой изложены материалы диссертации из 31 наименования. Общий объем работы – 61 страница, в том числе 33 рисунка.

**Во введении** определен предмет исследования и обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цель и основные задачи исследования; приведены защищаемые положения; дана оценка научной новизны полученных результатов и их практической ценности; приведены сведения об апробации работы; представлен краткий обзор структуры диссертации и определен личный вклад автора.

**В первой главе** диссертации в виде научного доклада рассмотрены оптические и лазерные характеристики широкополосных лазерных сред, активированных ионами иттербия. Представлено описание применяемых в работе основных методов исследования иттербиевых лазерных сред с учетом их особенностей, описывается разработанный метод измерения теплопроводности материалов. При исследованиях использовались также стандартные методы измерения рассеяния, фазовых и поляризационных искажений излучения, фотолюминесценции и другие. Температура образцов варьировалась вплоть до криогенных температур. Приведены результаты измерений характеристик лазерных керамик: оптических потерь (поглощение и рассеяние), спектральных характеристик и эффективности лазерной генерации в образцах Yb:YAG, изготовленных в ИЭ УрОРАН и

Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, изготовленных в ИХВВ РАН и ИЭ УрО РАН. Кроме того, в последней измерено время жизни возбужденного состояния примесного иона иттербия.

**Во второй главе** диссертации в виде научного доклада описываются способы оптимизации геометрии активных элементов иттербиевых лазеров. Описана разработанная технология изготовления тонкостержневых активных элементов кристалла Yb:YAG диаметром 1 мм и длиной до 40 мм из объемной заготовки без применения метода микровытягивания. Полировка боковой поверхности обеспечивает волноводное распространение накачки, а оригинальный способ охлаждения позволяет работать при предельно высокой тепловой нагрузке тонкостержневого активного элемента. В двухпроходной схеме усиления продемонстрировано усиление фемтосекундных импульсов со спектрально ограниченной длительностью 280 фс до миллиджоульного уровня энергии с увеличением средней мощности излучения с 5 до 50 Вт. Выполнены исследования и сравнение характеристик тонкостержневых усилительных модулей на основе Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub>, изготовленных по аналогичной технологии, в режиме регенеративного усиления.

Отмечается, что одним из лучших решений в области высокоомощных лазеров являются дисковые лазеры, обеспечивающие комбинацию высокой средней мощности, высокой эффективности, хорошего качества пучка и большой апертуры. При разработке таких элементов выполнено исследование эффекта нелинейного дополнительного тепловыделения в высоколегированных образцах, разработан метод монтажа дискового активного элемента на высокотеплопроводный радиатор (поликристаллический алмаз, карборунд) через ультратонкий слой фотополимерного клея. Оптимизация толщины активного элемента и числа проходов накачки выполнялась на основе численного совместного решения уравнения теплопроводности и балансных уравнений, с учетом эффекта усиленного спонтанного излучения.

Описывается создание и применение композитных дисковых активных элементов высокоэнергетических усилителей, геометрия которых позволяет выводить часть люминесценции из инверсной области благодаря отсутствию полного внутреннего отражения на границе между легированной и нелегированной частями активного элемента. Для повышения функциональности дисковых активных элементов при их использовании в высокоэнергетических лазерных системах разработана оригинальная технология термодиффузионной сварки кристаллов Yb:YAG и YAG или сапфира, позволяющая изготавливать образцы диаметром до 20 мм. На основе доработки многопроходной телескопической схемы разработан оригинальный способ значительного увеличения количества проходов через дисковый активный элемент.

**Третья глава** диссертации в виде научного доклада посвящена исследованиям характеристик криогенного дискового лазера с высокой средней и пиковой мощностью. Для оценки эффективности применения криогенного охлаждения был выполнен расчет запасенной энергии и усиления в дисковых и композитных дисковых активных элементах при непрерывной накачке с учетом температурных зависимостей основных термооптических и лазерных характеристик, а также эффекта УСИ. Показано, что оптимальная толщина активного элемента составляет  $\sim 0.8$  мм и не может быть значительно увеличена из-за термонаведенных эффектов.

При разработке лазерного усилителя с кристаллическими активными элементами Yb:YAG выполнен ряд исследований по усилению наносекундных лазерных импульсов в криогенно охлаждаемых дисковых активных элементах. В рамках исследований использовалось 2 подхода. На ранних этапах исследований был разработан задающий Yb:YAG генератор работающий в режиме модуляции добротности с разгрузкой резонатора. В заключительной части исследований криогенных лазеров в качестве задающего источника использовался волоконный фемтосекундный лазер с растяжением импульса до  $\sim 2$  нс объемными брэгговскими решетками и последующим усилением сигнала до  $\sim$  мДж уровня в регенеративном усилителе.

Разработана лазерная система с криогенным охлаждением дисковых Yb:YAG активных элементов, в которой излучение формируется в криогенном задающем генераторе и направляется в криогенный предусилитель с композитным дисковым активным элементом. Для эффективного извлечения энергии реализована многопроходная схема усиления на основе телескопа с переносом изображения. Выполнена серия экспериментов при импульсной и непрерывной накачке на различных частотах повторения лазерных импульсов. Достигнута энергия в импульсе до 150 мДж при частоте повторения 400 Гц и до 90 мДж при 1 кГц частоте повторения с 15% оптической эффективностью оконечного усилителя. Анализируется, что рост энергии в импульсе при уменьшенной частоте повторения ограничивается влиянием эффекта УСИ в дисковых активных элементах, а при непрерывной накачке и 1 кГц частоте повторения - закипанием жидкого азота в проточной системе охлаждения активного элемента.

В криогенном дисковом лазере выполнены дополнительные исследования с Yb:YAG керамическими элементами диаметром 20 мм и толщиной 1.4 мм с 5% допированием, изготовленными в лаборатории AMRC Наньянского Технологического Университета Сингапура. Отмечено, что для повышения пиковой мощности криогенных лазеров путем усиления лазерных импульсов методом CPA более оптимально применение



керамических полутороксидных лазерных сред. Выполнены экспериментальные исследования усиления широкополосных (более 1.5 нм) чирпированных лазерных импульсов в криогенно охлаждаемом дисковом активном элементе из  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$

**Четвертая глава** диссертации в виде научного доклада посвящена развитию и исследованию методов нелинейного уширения спектра излучения иттербиевых лазеров и его преобразования нелинейно-оптическими методами в различные спектральные диапазоны с последующей компрессией до фемтосекундной длительности. В последнем параграфе четвертой главы описаны, основанные на выполненных в диссертации исследованиях, разработанные и экспериментально реализованные схемы применения иттербиевых лазеров в стартовой части высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных систем.

Для дополнительного уменьшения длительности импульса фс иттербиевого лазера впервые экспериментально апробирован способ нелинейной самокомпрессии излучения в кристалле KDP. Показано, что аномальная дисперсия в кристалле KDP на длине волны 1030 нм обеспечивает самокомпрессию фс импульсов иттербиевого лазера при их нелинейном уширении со сжатием длительности импульса не менее 3 раз (с 280 фс до 94 фс) без уменьшения пиковой мощности излучения. Такой подход имеет преимущества для высокомогущных лазерных систем, поскольку не использует чирпирующие зеркала.

Разработана оригинальная параметрическая система формирования малоцикловых фс импульсов различных спектральных диапазонов напрямую из суб-пс иттербиевого лазера накачки. Экспериментально показано, что излучение суб-пс иттербиевого лазера с применением генерации суперконтинуума и дальнейших нелинейных преобразований может быть преобразовано в фемтосекундные импульсы длительностью 20-40 фс с перестраиваемой центральной длиной волны в диапазоне от 650 до 2400 нм.

На основе фемтосекундных и пикосекундных иттербиевых лазеров разработана стартовая часть фемтосекундной лазерной системы 2-мкм спектрального диапазона с мультитераваттной пиковой мощностью. Выполнены исследования параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны  $\sim 2$  мкм и накачкой пикосекундными импульсами иттербиевого лазера.

Разработана новая стартовая система для лазерного комплекса PEARL, обеспечивающая оптическую синхронизацию 20-ти фемтосекундного сигнала и накачки, а также управление временным профилем импульса накачки. Отмечается, что первые результаты использования новой стартовой системы в разовых выстрелах демонстрируют значительный рост пиковой мощности и стабильности от импульса к импульсу.

В завершающей части главы описан также дизайн разработанной на основе выполненных исследований схемы стартовой системы для мегасайенс установки XCELS. Дизайн основан на комбинации волоконных и твердотельных составляющих и нацелен на достижение высокой стабильности параметров излучения и возможности управления ими в широком диапазоне.

**В заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

### **Научная новизна результатов работы**

В диссертации в одном разделе объединены научная новизна и практическая значимость (стр. 7). При этом в разделе преобладает описание технологических достижений, несомненно важных для практических приложений и слабо отражена научная новизна представленных в диссертации исследований.

Тем не менее, можно отметить несколько наиболее интересных научных результатов.

Разработаны и экспериментально реализованы новые методы диагностики термооптических свойств (теплопроводности, нелинейного тепловыделения) иттербиевых активных сред.

Созданы и исследованы поликристаллические (керамические) иттербиевые лазерные среды в геометрии тонкого стержня, полученные из объемной заготовки без применения метода микровытягивания.

Разработана технология термодиффузионной сварки композитных дисковых активных элементов, в том числе из разнородных материалов Yb:YAG/Sapphir.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность нелинейной самокомпрессии 250 фс импульсов иттербиевого лазера в кристалле KDP до длительности менее 100 фс без уменьшения пиковой мощности излучения.

Разработана новая схема преобразователя субпикосекундных импульсов иттербиевых лазеров в фемтосекундные импульсы длительностью 20-40 фс с перестраиваемой центральной длиной волны в диапазоне от 650 до 2400 нм.

Разработана новая стартовая система для лазерного комплекса PEARL, обеспечивающая оптическую синхронизацию 20-ти фемтосекундного сигнала и накачки, а также управление временным профилем импульса накачки. Разработан дизайн стартовой системы для мегасайенс установки XCELS.

## Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы обусловлена необходимостью получения комплексных экспериментальных данных о параметрах лазерных активных сред на основе различных матриц, легированных ионами иттербия, для создания лазеров с высокой пиковой и средней мощностью.

В ходе выполнения исследований, представленных в данной диссертации, достигнут ряд наиболее значимых практических результатов:

Для эффективного усиления лазерного излучения с энергией в импульсе единицы миллиджоулей и средней мощностью в десятки ватт разработана технология создания тонкостержневых активных элементов из напрямую объемных заготовок без применения метода микровытягивания.

Разработана оригинальная технология создания дисковых лазеров, не уступающих по основным характеристикам разработкам ведущих научных групп. Для улучшения характеристик дисковых лазеров выполнен ряд работ по оптимизации геометрии дискового активного элемента и экспериментально продемонстрированы преимущества композитных активных элементов для работы в режиме усиления высокоэнергетических импульсов.

В непрерывном режиме работы многомодовой лазерной генерации в резонаторе с дисковым квантроном достигнута дифференциальная эффективность 60% с выходной лазерной мощностью 600 Вт и эта мощность ограничивалась лишь доступной мощностью накачки. С использованием 2-х квантронов в резонаторе достигнут киловаттный уровень средней мощности.

Впервые экспериментально продемонстрирована возможность нелинейной самокомпрессии 250 фс импульсов иттербиевого лазера в кристалле KDP до длительности менее 100 фс

На основе нелинейных взаимодействий разработан преобразователь суб-пс импульсов иттербиевых лазеров в фемтосекундные импульсы длительностью 20-40 фс с перестраиваемой центральной длиной волны в диапазоне от 650 до 2400 нм.

Практическая важность проведенных в диссертации экспериментальных и теоретических исследований подтверждается разработкой и созданием на их основе ряда уникальных лазерных систем:

- стартовая часть фемтосекундной лазерной системы 2-мкм спектрального диапазона с мультитераваттной пиковой мощностью;

- новая стартовая система для лазерного комплекса PEARL, обеспечивающая оптическую синхронизацию 20-ти фемтосекундного сигнала и накачки, а также управление временным профилем импульса накачки. от импульса к импульсу.
- дизайн стартовой системы для мегасайенс установки XCELS с высокой стабильностью параметров излучения и возможностью управления ими в широком диапазоне.

Результаты работы могут быть использованы в научно-исследовательских организациях: Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, МГУ, Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН, Институт лазерной физики СО РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, РФЯЦ-ВНИИТФ.

**У диссертации есть недостатки, которые необходимо отметить.**

Основные положения, выносимые на защиту, не совсем чётко сформулированы.

1. В первом защищаемом положении утверждается : «что позволяет обеспечивать лазерную генерацию с дифференциальной эффективностью выше 35% в дисковой геометрии активного элемента.»

В данной формулировке не определена верхняя граница достигнутой дифференциальной эффективности.

2. Защищаемое положение 3 звучит как: «Изготовление активных элементов тонкостержневой геометрии из объемной заготовки без применения метода микровытягивания обеспечивает коэффициент усиления лазерных импульсов более 11 раз за один проход в кристалле Yb:YAG при непрерывной накачке излучения, а также возможность создания активных элементов тонкостержневой геометрии из поликристаллических (керамических) иттербиевых лазерных сред.»

На наш взгляд, "изготовление" не может обеспечивать коэффициент усиления, положение сформулировано некорректно.

3. Аналогично четвертое защищаемое положение, начинающееся с «изготовление методом термодиффузионной сварки...» также сформулировано некорректно. Вероятно, такого результата позволяет добиться *использование* активных элементов изготовленных указанным образом.

В целом третьи и четвертые защищаемые положения в представленных формулировках, носят скорее технический характер и требуют дополнительных комментариев, разъясняющих их фундаментальность.



4. На стр. 38 автор утверждает «Выполненные эксперименты подтвердили теоретические расчеты, согласно которым данный подход представляет большой практический интерес для повышения пиковой мощности фемтосекундных неодимовых лазеров с длительностью не более 150 фс». В экспериментах автора использовался кристалл KDP большой длины, в котором при высоких интенсивностях будет развиваться самофокусировка. В диссертации не отражены способы преодоления этой проблемы.

5. При рассмотрении методов уменьшения фазовых искажений излучения в композитном дисковом активном элементе не рассматривалось влияние электронной компоненты, которое может быть значительным при высоких интенсивностях.

6. Стилистическое оформление работы соискателем создает препятствия для восприятия изложенного материала читателю. В тексте присутствуют многочисленные жаргонизмы, в ряде случаев употребления сравнительных характеристик величин соискателем не дается их количественного критерия. Содержание диссертационного материала отражает большой объем инженерной работы, проведенной соискателем, а результаты физико-математических исследований раскрыты в меньшей мере.

#### **Есть также замечания.**

1. В тексте диссертации содержится множество несогласованных предложений и опечаток. Автор использует жаргонизмы («слабовые лазеры», «порог инверсии», «высокояркая», «стретчирование», «компрессирование», и др.). Стиль написания текста значительно затрудняет его понимание.

2. Рисунки в тексте диссертации в плохом разрешении, во многих из них текст на английском языке (рис.13, 19 и др.).

3. В тексте есть разночтения:

На стр.11 про примесный ион иттербия написано "Другой важный недостаток – наличие поглощения излучения из возбужденного состояния». В то же время на стр.27 утверждается «Ион иттербия характеризуется небольшим квантовым дефектом (~9%) и отсутствием поглощения из возбужденного состояния». Данное разночтение требует разъяснений.

4. В разделе «Научная новизна и практическая значимость» указано, что для исследования оптических керамик использовался «вновь разработанные методы исследования новых широкополосных иттербиевых сред». Что значит «вновь разработанные»?

5. На стр. 5 написано «открывает возможности **сильного** улучшения термооптических и лазерных характеристик». Что такое "сильное улучшение" в данном случае?

6. На стр. 8 отмечается «С применением этих методов разработано несколько лазерных систем с одновременно высокой средней мощностью и энергией в импульсе. Такие лазерные системы будут оптимальными для применения в качестве излучения накачки нового поколения фемтосекундных параметрических лазеров».

Автор не раскрывает критерии оптимальности лазерной системы.

7. На стр.12 написано «Для измерения исследуемый образец помещается между двумя известными оптическими элементами с **максимально возможным тепловым контактом**».

Каков критерий качества теплового контакта и как его характеристики влияют на результаты измерений?

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки выполненного диссертационного исследования и не влияют на высокую научную значимость полученных автором результатов.

### **Заключение**

Основные научные результаты достаточно полно отражены в 31 опубликованной статье в реферируемых журналах, включенных в перечень ВАК, в том числе в журналах первого (Q1) и второго (Q2) квартилей по международной базе Scopus за последние 10 лет и доложены на семинарах ИПФ РАН, Всероссийских и Международных конференциях.

Содержание диссертации, научные положения и сформулированные выводы дают основание полагать, что цель исследования достигнута, а сформулированные в диссертации задачи успешно решены.

Совокупность полученных автором работы результатов может быть квалифицирована как научное достижение высокого уровня.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями на 26 сентября 2022 года), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук. Автор работы, Мухин Иван Борисович, достоин присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.3.19 — лазерная физика.

Диссертация Мухина И.Б. и отзыв на неё обсуждены и одобрены на заседании научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН) 06 сентября 2023 года, протокол № 1.

Отзыв составил

Главный научный сотрудник ИЛФ СО РАН,

д.ф.-м.н. Прудников Олег Николаевич

E-mail: oleg.prudnikov@gmail.com



Подпись главного научного сотрудника ИЛФ СО РАН

Прудникова Олега Николаевича

*удостоверяю*

Ученый секретарь ИЛФ СО РАН

к.ф.-м.н. Покасов Павел Викторович



**Сведения о ведущей организации**

Полное наименование организации в соответствии с уставом: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук

Сокращённое наименование: ИЛФ СО РАН

Юридический адрес: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева 15Б

телефон: +7 (383) 333-29-67

электронная почта: info@laser.nsc.ru

web-сайт: <http://www.laser.nsc.ru>