

## ОТЗЫВ

официального оппонента Старикова Федора Алексеевича

на диссертацию Мухина Ивана Борисовича

**«Оптимизация и применение иттербиевых лазеров для формирования фемтосекундного излучения с высокой пиковой и средней мощностью»**,  
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Диссертационная работа Мухина И.Б. посвящена исследованию, разработке и созданию иттербиевых лазеров с высокой пиковой и средней мощностью, а также их применению для генерации и усиления фемтосекундного излучения с высокой пиковой и средней мощностью. Иттербиевые лазеры отличаются высокой средней мощностью излучения, и использование этого преимущества при создании фемтосекундных лазеров является одной из актуальных задач современной лазерной физики. В диссертационной работе реализован комплексный подход к решению задачи разработки твердотельных Yb:YAG лазеров с одновременно высокой средней и пиковой мощностью, включающий исследование тепловых параметров системы, теоретическое и экспериментальное исследование тепловых эффектов в активных элементах, разработку лазерных квантронов и создание оптических схем лазеров. В качестве основного подхода рассматривается использование перспективных геометрий активных элементов. Исследован целый спектр научно-технических проблем в задаче создания дисковых иттербиевых импульсно-периодических лазерных систем с криогенным охлаждением. Сюда входит как диагностика и выбор подходящих лазерных сред, так и разработка методов 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.

Структурно диссертация Мухина И.Б. состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы.

**Во введении** обосновывается актуальность работы, выполнен обзор литературы по теме диссертации, сформулированы цели работы и задачи, которые

решались при ее выполнении, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

**В первой главе** приводятся методы исследования легированных иттербием активных сред и описаны их основные особенности. Представлены результаты комплексного исследования оптических и лазерных свойств иттербиевой лазерной керамики (в том числе, отечественного производства) и продемонстрирована возможность ее использования для создания лазеров с высокой средней мощностью излучения. Результаты первой главы регулярно применялись при исследовании основных характеристик лазерных сред при выполнении исследований, описанных во 2-й и 3-й главах.

**Во второй главе** представлены результаты исследований по оптимизации геометрии активных элементов с целью повышения пиковой и средней мощности излучения. Описаны исследования тонкостержневых активных элементов, в том числе и изготовленных из лазерной керамики, а также результаты усиления сигнала волоконных фемтосекундных лазеров в таких тонкостержневых элементах. Для дальнейшего увеличения энергии в импульсе оптимизированы основные параметры дискового квантрона и предложено использовать композитные дисковые активные элементы, соединенные методом термодиффузионной сварки. Показано, что в таких активных элементах возможно полное подавление параболической составляющей тепловой линзы.

**Третья глава** посвящена разработке лазерных усилителей с применением криогенного охлаждения. Представлены результаты разработки криогенного дискового лазера с активными элементами из  $\text{Yb:YAG}$ , с энергией на выходе более 100 мДж и частотой повторения импульсов до 500 Гц. Выполнено сравнение керамических и кристаллических активных элементов и продемонстрирована возможность усиления фемтосекундных импульсов в  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  при ее охлаждении жидким азотом.

**В четвертой главе** приводятся результаты применения иттербиевых лазеров для формирования и усиления фемтосекундных импульсов. Описаны экспериментальные результаты самокомпрессии и нелинейного уширения субпикосекундных импульсов иттербиевого лазера. Продемонстрирована возможность формирования ультракоротких фемтосекундных импульсов в

широком спектральном диапазоне (от 600 до 2400 нм) с помощью дальнейших нелинейных параметрических преобразований излучения. С применением этих исследований создана новая стартовая система лазерного комплекса петаваттного уровня PEARL, предложен дизайн стартовой системы для проектируемой установки XCELS класса мега-сайенс.

**В заключении** сформулированы основные научные результаты работы, среди которых можно выделить следующие:

- разработаны методы диагностики лазерных и термооптических свойств иттербиевых активных сред;
- разработаны технологии изготовления тонкостержневых, тонкодисковых и композитных дисковых квантронов, в том числе с применением новых широкополосных иттербиевых материалов;
- продемонстрирована высокоэффективная лазерная генерация в тонкодисковых активных элементах из Yb:YAG и Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики, а также показано, что в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамике возможно усиление субпикосекундных импульсов как при комнатной температуре активного элемента, так и с охлаждением жидким азотом;
- разработана технология изготовления композитных активных элементов и способы уменьшения в них термонаведенных фазовых искажений излучения;
- на основе дисковых квантронов создан криогенный дисковый лазер с высокой энергией импульса и частотой их повторения, в качестве активных элементов применена Yb:YAG керамика;
- экспериментально продемонстрирована возможность нелинейной самокомпрессии 250 фс импульсов иттербиевого лазера в кристалле KDP;
- разработан преобразователь субпикосекундных импульсов иттербиевых лазеров в фемтосекундные импульсы длительностью 20-40 фс с перестраиваемой центральной длиной волны в диапазоне от 650 до 2400 нм;
- оптимизирован способ управления спектрально-временным профилем chirпированного лазерного импульса за счет применения объемной chirпирующей брэгговской решетки;
- разработана 30 фс лазерная система 2 мкм спектрального диапазона с энергией в импульсе 25 мкДж;

– разработана новая стартовая система для лазерного комплекса PEARL, обеспечивающая оптическую синхронизацию 20 фс сигнала и накачки.

Текст диссертации обладает внутренним единством и не содержит некорректных заимствований. Личный вклад автора в работе отражен. Научные положения, выводы и рекомендации работы обоснованы. Полученные результаты являются оригинальными, имеют высокую научную и практическую ценность. Яркой заслугой соискателя является модернизация стартовой части лазерного комплекса петаваттного класса, позволившая получить долговременную стабильность выходной энергии. Достоверность результатов подтверждается применением разнообразных, согласованных между собой экспериментальных и расчетных методик. Полученные результаты уже используются в рамках развития Национального центра физики и математики.

По работе можно высказать следующие замечания.

В тексте присутствуют опечатки, а также стилевые неточности. Так, например, на стр. 6 в фразе «системы Sylos [18] с мульти-ТВт энергией в импульсе» вместо энергии нужно написать мощность. На стр. 9, в положении 3, выносимом на защиту, и в п.3 Заключения утверждается, что «изготовление элементов тонкостержневой геометрии ... обеспечивает коэффициент усиления лазерных импульсов более 11 раз ...», где вместо слова «изготовление» точнее написать «использование». Также можно высказать замечание, касающееся возможности создания сверхмощных лазерных систем. В кристаллах KDP, используемых для нелинейной компрессии фемтосекундных импульсов иттербиевых лазеров с длиной волны излучения 1.03 мкм, наблюдается линейное поглощение с коэффициентом около  $2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$  для обыкновенной волны и  $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$  для необыкновенной волны. Неплохо было бы оценить, как это ограничит среднюю выходную мощность (или время непрерывной работы) всей системы.

Указанные замечания ни в коей мере не уменьшают значимость результатов, полученных в диссертационной работе.

Диссертационная работа Мухина И.Б., таким образом, является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена крупная научная проблема в области физики иттербиевых лазеров и их применения для формирования ультракороткоимпульсного излучения с высокой пиковой и средней мощностью, имеющая важное значение для создания новой отечественной лазерной техники.

Тема диссертации соответствует специальности 1.3.19 «Лазерная физика». Основные результаты диссертации опубликованы в 31 статье за последние 10 лет в высокорейтинговых рецензируемых журналах первого (Q1) и второго (Q2) квартилей, индексируемых международными базами данных Scopus и/или Web of Science, а также доложены на различных международных конференциях.

Диссертационная работа Мухина И.Б. соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, защищаемым в виде научного доклада, а ее автор Мухин Иван Борисович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв составил:

доктор физико-математических наук,

начальник научно-теоретического отдела

Института лазерно-физических исследований

Федерального государственного унитарного предприятия

«Российский Федеральный ядерный центр –

Всероссийский научно-исследовательский институт

экспериментальной физики»,

заведующий кафедрой квантовой электроники

СарФТИ НИЯУ МИФИ

23.08.2023

Стариков Федор Алексеевич

607190, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37,

телефон: 8-83130-2-22-96, e-mail: starikov@otd13.vniief.ru

Докторская диссертация защищена по специальности 01.04.02–  
теоретическая физика

Достоверность подписи Ф.А. Старикова подтверждаю:

Ученый секретарь ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

кандидат физико-математических наук



А.О. Бликов