

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА  
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 исследованиям иттербиевых лазерных сред и созданию на их основе лазеров с высокой пиковой и средней мощностью излучения, в том числе для генерации и усиления фемтосекундных импульсов.

**Актуальность работы:** Иттербиевые активные среды позволяют создать лазеры с высокой средней мощностью излучения. Кроме того, широкий спектр усиления иттербиевых активных сред позволяет обеспечить создание фемтосекундных лазеров. Получение минимально возможной длительности импульса генерации является важной и актуальной задачей, включающей в себя как исследование новых широкополосных материалов, так и оптимизацию геометрии активных элементов. Другим перспективным подходом применения иттербиевых лазеров в фемтосекундной физике является применение их в качестве накачки параметрических или титан-сапфировых усилителей, что также позволяет значительно увеличивать среднюю мощность фемтосекундных источников излучения.

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

**Во введении** выполнен обзор литературы по теме диссертации, сформулированы основные цели и задачи, которые решались при выполнении работы. Приведена информация об актуальности работы и научной новизне полученных результатов. Представлена научная и практическая значимость выполненных исследований. Сформулированы выносимые на защиту положения.

**Первая глава** посвящена описанию новых, разработанных в работе методов исследований иттербиевых лазерных сред. В частности, представлен новый метод измерения теплопроводности оптических элементов, основанный на интересном использовании интерферометрического подхода, а также детально исследованы основные источники тепловыделения в активных элементах иттербиевых лазеров. Представлен ряд исследований образцов лазерной керамики и продемонстрирована возможность эффективной генерации в дисковой геометрии активного элемента. Основные результаты выполненных в первой главе исследований легли в основу работ по теоретическому моделированию при оптимизации геометрии активных элементов и разработке лазерных усилителей, описанных во 2-й и 3-й главах.

**Вторая глава** посвящена усилению фемтосекундных и наносекундных импульсов в иттербиевых активных элементах в условиях высокой средней мощности излучения. В качестве активных сред использовались материалы, описанные в 1-й главе (монокристаллы Yb:YAG и лазерная керамика Yb:YAG и Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Для усиления фемтосекундного излучения волоконных лазеров разработан новый способ создания

активных элементов в форме тонкого стержня, показана возможность изготовления данным способом активных элементов из лазерной керамики. Продемонстрировано усиление сигнала волоконных фемтосекундных лазеров в таких активных элементах (в виде тонкого стержня) с сохранением спектрально ограниченной длительности импульса в пределах 500 фс. Для дальнейшего увеличения энергии в импульсе выполнена оптимизация геометрии активного элемента дискового усилителя. Показано, что в композитных активных элементах возможно подавление паразитного эффекта усиленного спонтанного излучения, ограничивающего усиление в дисковых активных элементах. Представлены результаты разработки изготовления таких композитных элементов методом термомодифицированной сварки.

**В третьей главе** рассмотрена возможность повышения средней мощности и энергии в импульсе иттербиевых лазеров путем применения криогенного охлаждения активных элементов. Показано, что охлаждение активных элементов приводит к значительному улучшению их термооптических и лазерных характеристик, позволяя обеспечивать более эффективное запасание энергии и большее усиление в дисковых активных элементах. На основе дисковых активных элементов из монокристалла Yb:YAG создан криогенный дисковый усилитель с энергией на выходе более 100 мДж и частотой повторения импульсов до 500 Гц. С применением аналогичных активных элементов из поликристаллической керамики Yb:YAG энергия в импульсе была увеличена до 240 мДж с сохранением средней мощности излучения. Основным ограничением при усилении ультракоротких импульсов в криогенной конструкции является сужение спектра усиления Yb:YAG. Для преодоления этого ограничения предложено использовать лазерную керамику Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Экспериментально показано, что в этом материале при криогенных температурах спектрально ограниченная длительность усиленных импульсов может составлять менее 1 пс.

**Четвертая глава** посвящена созданию фемтосекундных лазерных источников на основе иттербиевых лазеров. Для уменьшения длительности импульса фемтосекундных лазеров на основе монокристалла Yb:CaF<sub>2</sub> применен подход нелинейного уширения в кристалле KDP с самокомпрессией импульса за счет отрицательной дисперсии групповой задержки. Дальнейшее уменьшение длительности импульса достигнуто с помощью генерации суперконтинуума, а последующее нелинейное параметрическое преобразование излучения суперконтинуума с использованием фемтосекундного Yb:CaF<sub>2</sub> лазера в качестве накачки позволило сформировать импульсы длительностью в несколько осцилляций поля с перестройкой центральной длины волны в широком спектральном диапазоне (от 600 до 2400 нм). Данные исследования легли в основу создания новой стартовой системы лазерного комплекса ПВТ уровня PEARL, что позволило на порядок повысить стабильность энергии в импульсе данной установки. В качестве развития данного направления исследований предложен дизайн стартовой системы для проекта мега-сайенс XCELS.

**Заключение** содержит основные научные результаты выполненных исследований, среди которых можно выделить следующие:

Изучен ряд новых широкополосных иттербиевых лазерных сред из оптической керамики, включая отечественные образцы. Показано, что керамические активные

элементы обладают характеристиками, близкими к аналогичным в монокристаллических лазерных средах, что позволяет создавать на их основе лазерные установки с высокой средней и пиковой мощностью.

Для эффективного усиления лазерного излучения с энергией в импульсе до нескольких мДж и высокой средней мощностью разработана технология создания активных элементов в виде тонкого стержня из объемных заготовок. Созданы тонкостержневые активные элементы, в том числе из широкополосных лазерных сред, что позволило усилить фемтосекундное излучение волоконных лазеров до уровня в десятки Вт без существенного сужения спектра.

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. Впервые экспериментально продемонстрированы преимущества сочетания криогенного охлаждения дисковых активных элементов с их композитной структурой. С применением этих методов разработано несколько лазерных систем, сочетающих режим излучения с высокой средней мощностью и высокой энергией в импульсе генерации.

Для дополнительного уменьшения длительности импульса фемтосекундного иттербиевого лазера впервые экспериментально апробирован способ нелинейной самокомпрессии излучения в кристалле KDP.

Разработана оригинальная параметрическая система формирования малоцикловых фемтосекундных импульсов различных спектральных диапазонов напрямую из субпикосекундного иттербиевого лазера накачки. С применением этой фемтосекундной системы создана новая стартовая часть ПВт лазерного комплекса PEARL, что приведет к значительному расширению экспериментальных возможностей установки PEARL в области взаимодействия излучения с веществом.

Полученные результаты являются оригинальными, обладают несомненной научной новизной и вносят значительный вклад в развитие физики фемтосекундных лазеров. Достоверность результатов подтверждается хорошим соответствием теоретических и экспериментальных результатов, представленные в диссертации результаты органично вписываются в картину современных исследований в лазерной физике. Автор диссертации внес решающий вклад во все выносимые на защиту положения и результаты.

#### **Замечания по работе**

Представленная работа выполнена на высоком научном уровне. Вместе с тем, по диссертационной работе можно сделать следующие замечания, связанные, в основном, с кратким форматом представления.

1. В Главе 2 слишком кратко описано получение активных элементов в виде тонких стержней напрямую из объемной заготовки. Следовало бы указать в чем оригинальность метода и отличие получаемых элементов от монокристаллических волокон.

2. В Главе 2 при описании преимуществ композитного дискового активного элемента слишком кратко описываются как вычисление оптимальной толщины диска (не указано для какой температуры проводились расчеты), так и влияние дополнительной

(пассивной) части диска не только на вывод люминесценции, но и на термомеханические искажения активной части.


### **Заключение.**

Указанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа Мухина И.Б., таким образом, является законченным научным трудом, охватывающим широкий круг вопросов. Текст диссертации хорошо структурирован и легко читается. Экспериментальная работа отличается хорошо продуманным системным подходом. Выводы основаны на большом и достоверном экспериментальном материале и подтверждаются математическими расчетами, выполненными с использованием адекватных моделей и исходных данных. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, хорошо обоснованы, обладают научной новизной и представляют как научную, так и практическую ценность. В работе содержится решение значимых теоретических и экспериментальных задач в физике иттербиевых лазеров. 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 соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, защищаемым в виде научного доклада, а ее автор заслуживает присуждения ему степени доктора физико-математических наук.

Заместитель директора ИОФ РАН  
доктор физико-математических наук,

  
09.09.2023

В.Б. Цветков

**ФИО:** Цветков Владимир Борисович

**Ученая степень:** доктор физико-математических наук

**Ученое звание:** нет

**Научная специальность:** 01.04.21 – лазерная физика (1.3.19)

**Должность:** заместитель директора по научно-организационной работе

**Место работы:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук» (ИОФ РАН)

**Адрес места работы:** 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38

**Тел.:** +7(499)5038777+390

**E-mail:** tsvetkov@lsk.gpi.ru



ПОДПИСЬ

ЗАБЕРЯЮ

*Цветкова В.Б.*

СЕКРЕТАРЯ ИОФ РАН

Глушков В.В.