

На правах рукописи

МУХИН Иван Борисович

**Оптимизация и применение иттербиевых лазеров  
для формирования фемтосекундного излучения с  
высокой пиковой и средней мощностью**

01.3.19 — лазерная физика

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
в виде научного доклада

Нижний Новгород – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН, г. Нижний Новгород)

## Содержание диссертации

<b>Введение</b> .....	4
<b>Основное содержание работы</b> .....	11
<b>Глава 1. Исследование оптических и лазерных характеристик широкополосных лазерных сред, легированных иттербием</b> .....	11
1.1. Особенности легированных иттербием лазерных сред и описание методов исследования.....	11
1.2. Исследование оптических и лазерных характеристик образцов лазерной керамики.....	15
<b>Глава 2. Оптимизация геометрии активных элементов иттербиевых лазеров</b> .....	19
2.1 Активные элементы тонкостержневой геометрии для усиления фемтосекундных импульсов.....	19
2.2 Оптимизация дисковой геометрии для приложений с высокой средней мощностью.....	22
2.3 Усиление импульсов в дисковых активных элементах.....	24
<b>Глава 3. Криогенный дисковый лазер с высокой средней и пиковой мощностью</b> .....	27
3.1 Лазерный усилитель с кристаллическими активными элементами.....	29
3.2 Лазерный усилитель с керамическими активными элементами.....	34
<b>Глава 4. Применение иттербиевых лазеров в стартовой части высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных установок</b> .....	37
4.1 Нелинейное преобразование суб-пс импульсов иттербиевых лазеров в различные спектральные диапазоны с последующей компрессией до фемтосекундной длительности.....	37
4.2 Параметрическое усиление фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны $\sim 2$ мкм.....	40
4.3 Новая стартовая часть петаваттной лазерной установки PEARL...	43
4.4 Иттербиевые лазеры и фемтосекундные источники на их основе для создания мегасайенс установки XCELS.....	46
<b>Заключение</b> .....	49
<b>Список литературы</b> .....	51
<b>Список литературы кватрилей Q1 и Q2, в которой изложены материалы диссертации</b> .....	58

## ВВЕДЕНИЕ.

### Предмет исследования и актуальность темы

Повышение одновременно средней и пиковой мощности лазерного излучения является одним из важных направлений развития лазерной физики. Основным ограничением в данном направлении является противоречие между способами повышения пиковой мощности и средней мощности. Для пиковой мощности требуются активные элементы с большой апертурой, чтобы избежать пробоя, и большим объемом, чтобы запастись достаточно энергии. Однако большие размеры активного элемента усложняют теплоотвод из инверсной области, что усложняет увеличение средней мощности.

Одним из наиболее перспективных направлений одновременного увеличения как средней, так и пиковой мощности является использование иттербиевых лазерных сред в сочетании с диодной накачкой [1-3]. Благодаря малому «дефекту кванта» и отсутствию поглощения из возбужденного состояния ион иттербия позволяет значительно снизить (по сравнению с неодимом) тепловую нагрузку на активный элемент, что приводит к возможности увеличения средней мощности излучения. Дополнительное уменьшение тепловых эффектов обеспечивается путем оптимизации геометрии активной среды, ярким примером являются волоконные и дисковые лазеры. Другим преимуществом иона иттербия является его относительно широкая полоса усиления, что позволяет генерировать и усиливать лазерные импульсы суб-пс длительности [4, 5].

Для развития иттербиевых лазеров с одновременно высокой средней и пиковой мощностью необходима дальнейшая оптимизация как используемых активных сред, так и геометрии активного элемента, а также способов его охлаждения. Если необходимо обеспечить высокую эффективность генерации и усиления лазерных импульсов, определяющую роль имеет оптическое и лазерное качество активной среды. Особенно это относится к высоколегированным иттербиевым средам дисковых лазеров, в которых на первое место выходит эффект нелинейного тепловыделения [A1, 6]. Таким образом, актуальной является как задача диагностики материалов, так и исследование способов изготовления широкоапертурных активных элементов с наилучшими тепловыми и лазерными характеристиками. Например, для создания высокоэнергетических лазеров перспективными являются керамические активные элементы благодаря их большой апертуре [7, 8]. Другим преимуществом лазерной керамики является возможность ее изготовления из новых широкополосных сред, в частности, полупрозрачно-оксидных. Это создает дополнительную актуальность исследования и характеристики керамических лазерных сред.

Средняя мощность лазерного излучения во многом определяется геометрией активного элемента и способом отвода тепла от него. Наибольшую среднюю мощность излучения обеспечивают волоконные, дисковые и слэбовые лазеры. Однако каждая из этих геометрий активного элемента имеет свои недостатки: волоконные лазеры ограничены по пиковой мощности излучения; дисковые – обеспечивают очень малую величину усиления, из-за чего не оптимальны для усиления высокоэнергетических импульсов; лазерам на слэбах свойственно ухудшение оптического качества лазерного пучка. Исследования по оптимизации этих геометрий ведутся практически с момента создания твердотельных лазеров. Появление новых технологий приводит к значительному изменению как геометрии активного элемента, так и способов его охлаждения. Так, появление тонкостержневых активных элементов в сочетании с высокояркой диодной накачкой с волоконным выходом позволяет достигать очень большого усиления (сравнимого с усилением в волоконных лазерах), но избегать паразитных нелинейных эффектов, характерных для волоконных лазеров [A2, 9, 10]. Композитная геометрия дискового активного элемента позволяет подавлять усиленное спонтанное излучение (УСИ) и значительно увеличить усиление сигнала за проход с сохранением средней мощности излучения. Развивающиеся в последнее время технологии криогенного охлаждения активных элементов открывают возможности сильного улучшения термооптических и лазерных характеристик легированных иттербием сред [11], что позволяет дополнительно оптимизировать геометрию активного элемента на предмет повышения средней и пиковой мощности излучения. Сочетание технологий изготовления иттербиевых дисковых активных элементов (в том числе, керамических) с криогенным охлаждением и высокояркой накачкой позволяют на сегодняшний день создавать лазерные установки кВт уровня средней мощности с энергией в импульсе единицы и десятки Дж [12, 13].

При достижении суб-пс длительности импульсов иттербиевых лазеров открывается дополнительная возможность повышения пиковой мощности за счет нелинейных преобразований лазерных импульсов. Эффект нелинейного уширения спектра высокоинтенсивного импульса при его прохождении через среду с кубичной нелинейностью хорошо известен. Однако, из-за наличия нелинейной дисперсии необходимо дополнительно компрессировать лазерный импульс до длительности, близкой к спектрально ограниченной для уширенного спектра излучения. Наиболее эффективно эта проблема может быть решена применением диэлектрических зеркал с заданной (как правило, отрицательной) квадратичной дисперсией. Одним из выдающихся результатов является демонстрация компрессии 70 фс лазера в 10 фс длительность с достижением ПВт уровня пиковой мощности [14]. В качестве нелинейной среды использовалась пластина KDP с последующей дополнительной компрессией импульса парой чирпирующих зеркал. Также продемонстрирована компрессия излучения иттербиевых дисковых лазеров с суб-

пс длительностей вплоть до  $\sim 100$  фс с пренебрежимо малыми потерями энергии мульти-мДж импульсов [15]. При этом использовалась самокомпрессия в газовой среде с дополнительной компенсацией положительной квадратичной дисперсии chirпирующими диэлектрическими зеркалами. Описанные выше подходы нелинейной самокомпрессии импульсов имеют свои, связанные с масштабированием, ограничения, и исследования в данном направлении по-прежнему остаются актуальными.

Одним из эффектов, близких к нелинейной самокомпрессии в среде является генерация суперконтинуума. Ширина спектра этого излучения позволяет формировать импульсы длительностью вплоть до одной осцилляции поля [16]. Однако эффективность преобразования суб-пс импульсов в излучение суперконтинуума составляет доли процента. В связи с этим активно исследуется параметрическое усиление излучения суперконтинуума с использованием в качестве накачки основной части суб-пс импульса. Например, в работе [17] продемонстрировано преобразование 300 фс импульсов Yb:KGW лазера в 6.3 фс с повышением пиковой мощности в  $\sim 2$  раза. Описанные в этой работе идеи развиваются и на сегодняшний день позволяют создавать высокомошные фс лазерные системы с использованием иттербиевого суб-пс лазера в качестве задающего источника излучения без использования отдельного фемтосекундного источника (например, Ti:Sa). Одним из выдающихся результатов в данном направлении является разработка лазерной системы Sylos [18] с мульти-ТВт энергией в импульсе и килогерцовой частотой повторения импульсов. Кроме того, создаются фемтосекундные системы с высокой частотой повторения импульсов среднего инфракрасного диапазона [19]. Важным преимуществом такого метода является простота оптической синхронизации стретчированного фс импульса и пикосекундного импульса накачки, поскольку в качестве накачки обычно выступают высокоэнергетические Yb:YAG усилители исходного суб-пс иттербиевого лазера.

Таким образом, можно констатировать значительное развитие технологий создания иттербиевых лазеров в последние годы. При этом применение иттербиевых лазеров с высокой средней мощностью в создании фемтосекундных источников излучения становится все более актуальным.

## **Цель работы**

Основной целью диссертационной работы является исследование, разработка и создание иттербиевых лазеров с высокой пиковой и средней мощностью и их применение для генерации и усиления фемтосекундного излучения с высокой пиковой и средней мощностью.

В рамках работы решались следующие задачи:

Разработка и оптимизация методов исследования лазерных и термооптических характеристик иттербиевых лазерных сред. Исследование харак-

теристик широкополосных иттербиевых сред (в частности, полуторооксидной лазерной керамики) в качестве активных элементов лазеров и возможности их применения для усиления фемтосекундных импульсов.

Исследование и оптимизация тонкостержневой, тонкодисковой, композитной геометрии активного элемента, а также способов его охлаждения для повышения энергии в импульсе наносекундных иттербиевых лазеров с сохранением высокой средней мощности излучения.

Исследования в области нелинейной самокомпрессии суб-пс импульсов иттербиевых лазеров, а также нелинейное преобразование излучения иттербиевых лазеров в излучение суперконтинуума. Формирование малоцикловых фемтосекундных импульсов в различных спектральных диапазонах на основе суб-пс иттербиевого лазера.

Создание иттербиевых лазерных систем с высокой средней и пиковой мощностью, а также создание уникальных малоцикловых фс лазерных систем с оптической синхронизацией с излучением лазера накачки. В частности, создание новой стартовой системы лазерного комплекса ПВт уровня PEARL.

### **Научная новизна и практическая ценность диссертации:**

В ходе выполнения исследований, представленных в данной диссертации, достигнут ряд значимых результатов. С помощью вновь разработанных методов исследования новых широкополосных иттербиевых сред [А3, 20, 21] изучен ряд лазерных сред из оптической керамики, включая отечественные образцы. Данные исследования [А4-А9] позволили значительно улучшить оптическое и лазерное качество изготавливаемых образцов. На сегодняшний день можно утверждать, что создаваемые по результатам этих исследований 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. Исследования характеристик широкоапертурных активных элементов Yb:YAG, выращенных методом горизонтально-направленного роста, продемонстрировали возможность их изготовления с качеством, близким к аналогичным образцам, выращенным методом Чохральского, при рекордных размерах диаметром до 15 см, что открывает возможности создания высокоэнергетических иттербиевых лазеров не только на основе лазерной керамики, но и монокристаллических активных элементов [А1, 21, 22].

Для эффективного усиления лазерного излучения с энергией в импульсе единицы мДж и средней мощностью в десятки Вт разработана технология создания тонкостержневых активных элементов из напрямую объемных заготовок без применения метода микровытягивания [А10]. Такие активные элементы благодаря малому диаметру и волноводному распространению накачки, обладают эффективным теплоотводом, рекордным усиле-

нием за проход и являются оптимальным решением для усиления лазерных импульсов после волоконных лазеров [A2, A11]. В частности, благодаря возможности изготовления такого типа активных элементов из объемных заготовок, созданные тонкостержневые активные элементы, в том числе из широкополосных лазерных сред, позволили значительно повысить среднюю и пиковую мощность фемтосекундных лазеров ведущих производителей [A12-A14].

Широко известная дисковая геометрия активного элемента обеспечивает рекордные значения одновременно средней и пиковой мощности излучения. В ходе ряда работ [A15-A18] была 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 [A19-A22, 23]. Демонстрированы преимущества сочетания криогенного охлаждения дисковых активных элементов с их композитной структурой [A23, 42, 43]. С применением этих методов разработано несколько лазерных систем с одновременно высокой средней мощностью и энергией в импульсе [A24-A26, 44,45]. Такие лазерные системы будут оптимальными для применения в качестве излучения накачки нового поколения фемтосекундных параметрических лазеров [24].

Выполнен ряд исследований усиления лазерных импульсов в иттербиевых усилителях методом CPA [A12, A27, 50]. В сочетании с применением новых широкополосных сред, такой метод позволяет усиливать лазерные импульсы длительностью значительно меньше 1 пикосекунды, обеспечивая фс диапазон длительностей иттербиевых лазеров [A12]. При достижении фс длительности импульсов иттербиевых лазеров открываются дополнительные возможности формирования фс лазерных импульсов, в том числе в различных спектральных диапазонах, за счет нелинейных преобразований. Для дополнительного уменьшения длительности импульса фс иттербиевого лазера впервые экспериментально апробирован способ нелинейной самокомпрессии излучения в кристалле KDP [A28]. Такой подход имеет преимущества для высокомошных 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 [A29, 25, 26]. С применением этой фс системы создана новая стартовая часть ПВТ лазерного комплекса PEARL, что позволило существенно улучшить ее стабильность от импульса к импульсу и привело к значительному расширению экспериментальных возможностей установки PEARL в области взаимодействия излучения с



веществом [A30, A31]. На основе выполненных исследований разработан дизайн стартовой части мега-сайенс установки XCELS [27, 28]. С применением малоцикловой фс системы и иттербиевых лазеров накачки разрабатывается фс система среднего инфракрасного диапазона с высокой пиковой и средней мощностью [26]. Данная установка позволит сформировать отечественную экспериментальную базу для исследований в области аттосекундной физики.

Таким образом, диссертационная работа представляет собой комплексное исследование, в котором развиты методы исследований иттербиевых материалов, создание на их основе высокомошных иттербиевых лазеров и преобразование излучения иттербиевых лазеров в фемтосекундный диапазон длительностей. Выполненные экспериментальные исследования подкреплены теоретическими и численными исследованиями.

Выполненное диссертационное исследование является актуальным, оригинальным, соответствует мировому уровню и современным направлениям исследований в лазерной и нелинейной оптике, вносит существенный вклад в развитие данных областей и открывает новые перспективы в области разработки лазерных систем с уникальными параметрами. Совокупность полученных автором работы результатов может быть квалифицирована как научное достижение высокого уровня.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Иттербиевая лазерная керамика  $\text{Yb}(\text{La})\text{:Y}_2\text{O}_3$ , изготавливаемая методом твердофазного синтеза, обладает теплопроводностью, сечениями усиления и поглощения, временем жизни верхнего лазерного уровня и нелинейным тепловыделением близкими к аналогичным в монокристаллической среде, что позволяет обеспечивать лазерную генерацию с дифференциальной эффективностью выше 35% в дисковой геометрии активного элемента.

2. Применение иттербиевых лазерных сред из полутороксидной керамики  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  обеспечивает усиление чирпированных лазерных импульсов как в тонкостержневой, так и в дисковой геометрии активного элемента с минимальной (спектрально ограниченной) длительностью не более 500 фс при комнатной температуре и не более 900 фс при охлаждении жидким азотом.

3. 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  $\text{Yb:YAG}$  при непрерывной накачке излучения, а также возможность создания активных элементов тонкостержневой геометрии из поликристаллических (керамических) иттербиевых лазерных сред.

4. Изготовление методом термодиффузионной сварки композитных дисковых активных элементов Yb:YAG/YAG и Yb:YAG/Sa и их монтаж на специально профилированный радиатор позволяют увеличить плотность запасенной энергии и уменьшить термонаведенные фазовые искажения при непрерывной накачке активного элемента.

5. 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.

6. Пространственное модулирование пучка при его наклонном падении на чирпирующую объемную брэгговскую решетку позволяет реализовать спектрально-временное профилирование наносекундного чирпированного импульса иттербиевого или неодимового лазера со спектральным разрешением не хуже 0.16 нм и временным разрешением не хуже 0.15 нс

7. Излучение суб-пс иттербиевого лазера с применением генерации суперконтинуума и дальнейших нелинейных преобразований может быть преобразовано в фемтосекундные импульсы длительностью в несколько осцилляций поля и стабилизацией э/м колебаний относительно огибающей с перестройкой центральной длины волны в широком (от 650 до 2400 нм) спектральном диапазоне.

8. Лазерные импульсы 2-х мкм спектрального диапазона длительностью менее 50 фс могут быть параметрически усилены в кристалле ВВО в фурье-плоскости дисперсионной схемы с нулевой дисперсией при накачке импульсами иттербиевого лазера длительностью 20 пс.

### **Апробация работы.**

Настоящая диссертационная работа является итогом исследований, проведенных автором в Институте прикладной физики РАН в 2013-2023 гг. Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИПФРАН, а также на 28 международных конференциях. По теме диссертации опубликована 41 статья в реферируемых журналах, включая 31 статью квартилей Q1 и Q2 по базе Scopus и/или Web of Science за последние 10 лет.

### **Личный вклад автора.**

Все выносимые на защиту положения и результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии или руководстве. Автору принадлежит определяющий вклад в концептуализацию и постановку всех задач диссертационной работы, постановку и проведение экспериментальных и численных исследований, а также в интерпретацию результатов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Глава 1. Исследование оптических и лазерных характеристик широкополосных лазерных сред, легированных иттербием

#### 1.1 Особенности легированных иттербием лазерных сред и описание методов исследования

Для создания лазеров с высокой средней и пиковой мощностью все чаще используются лазерные среды, легированные ионом иттербия (Yb). В основном, это связано с появлением высоко эффективных диодных лазеров с излучением на длинах волн 900-1000 нм, то есть в том диапазоне, где ион Yb имеет максимумы в спектре поглощения. Можно выделить несколько преимуществ иона Yb перед ионом неодима (Nd). Ион иттербия характеризуется небольшим квантовым дефектом ~9%. Довольно большое время жизни порядка 1 мс позволяет, несмотря на небольшую пиковую мощность диодной накачки, запастись энергии, сравнимые с Nd при ламповой накачке. Благодаря высокому легированию, лазеры на Yb могут быть эффективны в дисковой геометрии. Отвод тепла от торца диска позволяет эффективно решать задачу охлаждения, а высокая концентрация Yb обеспечивает высокое усиление. Небольшая толщина диска позволяет исключить эффект самофокусировки в импульсных лазерах с высокой пиковой мощностью.

С другой стороны, ион Yb имеет и ряд недостатков. Основной уровень энергии и нижний лазерный уровень близки друг к другу. Поэтому при комнатной температуре нижний лазерный уровень Yb заселен примерно на 5% от общего числа ионов (согласно распределению Больцмана). Это приводит к значительному увеличению порога усиления по накачке. Другой важный недостаток – наличие поглощения излучения из возбужденного состояния [29], причем этот эффект сильно зависит от наличия примесей и качества изготовления материала. Также от легирования, наличия примесей и качества изготовления наблюдается значительная зависимость теплопроводности материала. Для иттербиевых лазеров чрезвычайно перспективным является охлаждение активной среды до криогенных температур (80- 200 К). При охлаждении нижний лазерный уровень опустошается, и лазерная среда становится четырехуровневой, растут сечения усиления и поглощения [30, 31], теплопроводность. А также значительно уменьшаются поляризационные и фазовые искажения за счет изменения оптических характеристик лазерной среды [32, 33]. Необходимо отметить, что, если на начальном развитии иттербиевых лазеров основной активной средой являлся Yb:YAG, то значительный прогресс в создании новых керамических лазерных материалов значительно расширяет ассортимент лазерных сред,

легированных иттербием. При этом, лазерные и тепловые характеристики этих сред могут зависеть от особенностей изготовления этих материалов различными методами. Более того, значительное повышение средней мощности и энергии в импульсе иттербиевых лазеров привело к необходимости масштабирования активных элементов Yb:YAG до апертуры в несколько сантиметров, что возможно либо изменением метода роста монокристаллических элементов, либо применением керамических активных элементов Yb:YAG.

Таким образом, дополнительные исследования и постоянный контроль лазерных и тепловых характеристик лазерных сред иттербиевых лазеров является ключевым фактором для развития лазеров с одновременно высокой средней и пиковой мощностью. Ниже представлено описание применяемых в работе основных методов исследования иттербиевых лазерных сред с учетом их особенностей.

### **Измерение теплопроводности образцов оптических элементов.**

Тепловые процессы в оптических элементах лазеров имеют важное значение при разработке высокомоощных твердотельных лазеров. При заданном тепловыделении величина нагрева оптического элемента определяется теплопроводностью материала. Соответственно, точное значение теплопроводности чрезвычайно важно для расчета геометрии активного элемента и оптимизации способа его охлаждения. Особенно это важно для новых, плохо исследованных материалов. При этом, измерение теплопроводности в новых образцах обычно принятыми методами может быть значительно затруднено из-за сочетания высокой теплопроводности и небольших размеров образца.

Для решения этой проблемы разработан простой метод измерения теплопроводности материалов [A3]. Для измерения исследуемый образец помещается между двумя известными оптическими элементами с максимально возможным тепловым контактом (рис. 1а). Один из оптических элементов охлаждается, другой нагревается. Соотношение размеров образцов и оптических элементов должно быть таким, чтобы радиальные градиенты температуры были пренебрежимо малы. Такая сборка помещается в оптический интерферометр, и измеряется изменение оптического пути в известных оптических элементах (рис. 1б). Поскольку характеристики ( $dn/dT$ ,  $dL/dT$  и др.) известных оптических элементов измерены с высокой точностью, возможно также с высокой точностью восстановить профиль температуры в обоих известных оптических элементах. В том числе, скачок температуры, приходящийся на измеряемый образец (рис. 1в). Зная скачок температуры на образце и тепловое сопротивление между известными оптическими элементами и образцом нетрудно вычислить теплопроводность материала.

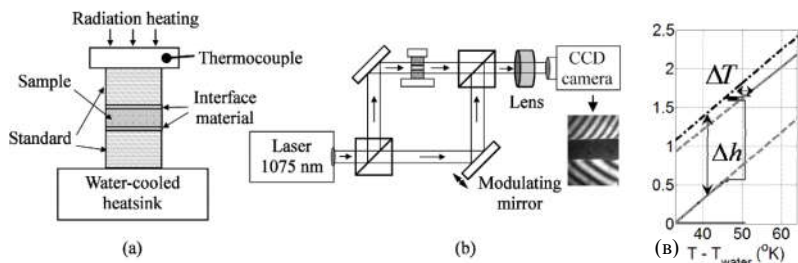


Рис. 1. Вид сборки для измерения теплопроводности (а), измерение изменения оптического пути в сборке (б), характерный график измеренного в образце скачка температуры (в).

Описанный выше метод опробован на ряде как известных материалов, так и новых лазерных сред. Его преимуществом является возможность измерения в широком диапазоне теплопроводностей материалов (от 0.5 до ~ 100 Вт/м/К), выполнять измерения в трудных условиях (например, при охлаждении образца до криогенных температур). В отличие от «флеш»-метода [34] не требуется знание других характеристик исследуемого образца (теплоемкости, коэффициента излучения и др.). В ходе выполнения представленных в работе исследований, описанный выше оригинальный метод измерения теплопроводности регулярно применялся для тестирования новых лазерных сред.

### Измерение тепловыделения в легированных иттербием лазерных средах.

Дефект кванта является преобладающим механизмом тепловыделения в иттербиевых лазерных средах. Его величина вычисляется исходя из спектров поглощения и люминесценции используемых элементов. Тем не менее, другие источники тепловыделения также могут играть существенную роль в лазерах с высокой средней мощностью. Из них можно выделить линейное нерезонансное поглощение [35], обычно не связанное с активатором, а также различные пути нерадикационной релаксации возбужденных состояний иттербия [29]. Причем, последние эффекты носят, как правило, коллективный характер и их вклад значительно растет с увеличением концентрации возбужденных ионов.

Измерение тепловыделения в легированных иттербием лазерных средах выполнялось с помощью модифицированного «флеш»-метода [A1]. На исследуемый образец направляется лазерное излучение с высокой средней мощностью. При измерении нерезонансного поглощения длина волны составляет ~1070 нм; а при исследовании тепловых эффектов, связанных с резонансным поглощением – в области 1030 нм (рис. 2). Суть метода заключается в том, что, зная мощность излучения, теплоемкость и теплопроводность материала образца, можно вычислить величину поглощенного

тепла при измерении температуры его поверхности тепловой камерой. Если изменение линейного нерезонансного поглощения таким методом является довольно стандартным подходом, то облучение образца на резонансной длине волны, соответствующей переходу с частично заселенного нижнего лазерного уровня на верхний лазерный уровень позволяет обеспечить частичную заселенность верхнего лазерного уровня для исследований нерадиационной релаксации возбужденных состояний. При таком возбуждении средняя длина волны люминесценции находится в более коротковолновом диапазоне и дефект кванта становится отрицательным (что должно приводить к охлаждению исследуемого элемента). Наличие и величина нагрева в этом случае свидетельствует о процессах нерадиационной релаксации, о чем более подробно сказано в работе [A1].

Данный метод позволил провести ряд исследований по влиянию качества изготовления кристаллических и керамических материалов. В частности, с применением этого метода оптимизирована технология горизонтально направленного роста кристаллов Yb:YAG и продемонстрирована возможность их роста с большой апертурой и лазерным качеством, близким к лучшим образцам кристаллов, выращенных методом Чохральского [A1, 21, 22].

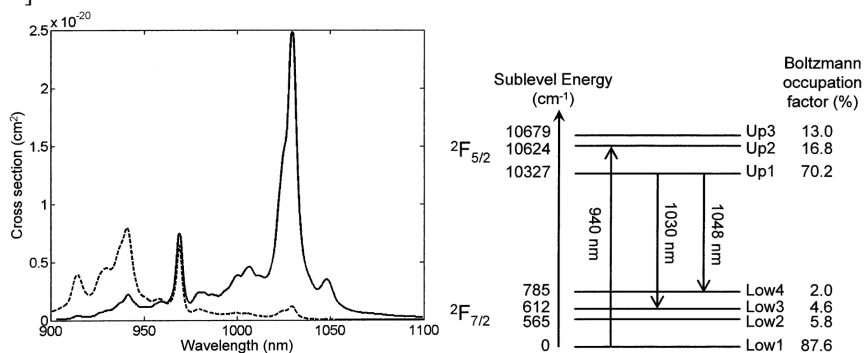


Рис. 2. Спектры усиления и поглощения, а также система лазерных уровней кристалла Yb:YAG [36].

### Измерение сечений поглощения и усиления, времени жизни в иттербиевых лазерных средах.

Измерение таких величин как время релаксации верхнего рабочего уровня или сечение усиления также осложнены в иттербиевых средах из-за так называемого «захвата» излучения, который связан с тепловым заселением нижнего лазерного уровня при переходе вблизи 1030 нм. Это приводит к тому, что лазерный сигнал в отсутствие накачки поглощается и переизлучается снова, что значительно влияет на наблюдаемое время релаксации люминесценции и её спектр, и как следствие, на «наблюдаемый»

спектр сечения усиления. В связи с этим, для корректного измерения спектра и времени жизни люминесценции использовались оптимизированные методы измерений, основанные на работах [37, 38], но с модификацией при нормировке спектров и при аппроксимации пин-холл методом.

Описанные выше измерения использовались для исследований различных образцов иттербиевых активных сред, включая монокристаллические, керамические, а также различного вида стекла и композитные материалы. При исследованиях использовались также стандартные методы измерения рассеяния, фазовых и поляризационных искажений излучения, фотолюминесценции и другие. Варьировалась температура образца, вплоть до криогенных температур, легирование иттербием и другие характеристики. В дополнение, ключевым фактором, характеризующим оптическое и лазерное качество, являлась эффективность лазерной генерации в изготовленном из данного материала активном элементе.

## **1.2 Исследование оптических и лазерных характеристик образцов лазерной керамики**

Прозрачные поликристаллические материалы на основе алюмоиттриевого граната  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG), активированного редкоземельными ионами, привлекли значительное внимание после того, как группе японских учёных удалось синтезировать Nd:YAG-керамику с высоким оптическим качеством и получить в ней эффективную лазерную генерацию [39]. Лазерная керамика обладает следующими преимуществами перед монокристаллами: меньшей температурой синтеза, возможностями получения образцов с большими поперечными размерами и обеспечения композитной структуры, а также заданного профиля распределения активатора с целью подавления паразитных тепловых эффектов. Другим важным преимуществом лазерной керамики является возможность изготовления керамических материалов, которые невозможно (или трудноосуществимо) вырастить в монокристаллическом виде. Самыми перспективными такими материалами являются легированные иттербием полутороксидные керамики (Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.) благодаря более широкой полосой усиления и высокой теплопроводностью по сравнению с Yb:YAG, что актуально для развития иттербиевых фемтосекундных лазеров.

### **Исследование образцов лазерной керамики Yb:YAG.**

Для освоения технологии создания керамических активных элементов важным этапом является создание образцов, близких по своим характеристикам к аналогичным монокристаллическим. Наиболее подходящим материалом для этого является Yb:YAG. Выполнен ряд исследований оптического и лазерного качества керамических элементов Yb:YAG, изготовленных коллегами из Института электрофизики УрО РАН. Образцы были из-

готовлены методом твердофазного синтеза, исходные нанопорошки для которого получены методом лазерного испарения. Измерены оптические потери (поглощение и рассеяние) в образцах, выполнено исследование спектральных характеристик, исследована эффективность лазерной генерации [Аб, 40]. В ходе последовательного улучшения метода изготовления достигнуто оптическое и лазерное качество, близкое по основным параметрам к монокристаллическим материалам. Коэффициент пропускания исследуемых образцов достигал 82.6%, что на 1% меньше теоретического значения. Время жизни верхнего лазерного уровня составило 950 мкс, что близко к значению в монокристаллических элементах, выращенных методом Чохральского. Для измерения эффективности лазерной генерации из исследуемых образцов изготовлены дисковые активные элементы (по схеме «активного зеркала») и выполнены исследования в режимах импульсной и непрерывной накачки. В импульсном режиме накачки дифференциальная эффективность генерации составила 36% (рис. 3), а в непрерывном – 28% [А9]. Эти значения уступают эффективности генерации в монокристаллах, выращенных методом Чохральского (дифференциальная эффективность до 60%), что, во многом, связано с остаточными потерями излучения на рассеяние и наличием нелинейного перепоглощения. Тем не менее, достигнута рекордная для отечественных керамических образцов средняя мощность излучения 80 Вт [А9]. В рамках исследований изучались и другие керамические материалы. В частности, исследованы спектральные характеристики керамических образцов шпинели, легированной иттербием  $\text{Yb:MgAl}_2\text{O}_4$  [А8]. Показано, что, благодаря спектру люминесценции, смещенному в коротковолновую область до 1009 нм, данный материал может обеспечить лазерную генерацию с предельно малым дефектом кванта (порядка 3%), что актуально для криогенно охлаждаемых иттербиевых материалов. В сочетании с высокой теплопроводностью (в 3 раза выше, чем у  $\text{Yb:YAG}$ ), этот материал перспективен для лазеров с высокой средней мощностью.



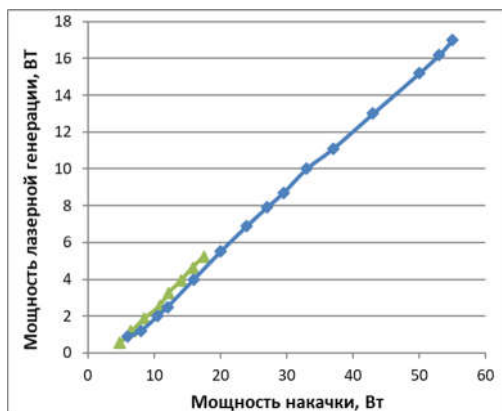


Рис.3. Зависимость средней мощности лазерной генерации керамическом образце Yb:YAG в квази-непрерывном режиме излучения при диаметре пучка накачки 3.5 мм (зеленые точки) и 5 мм(синие точки)

### Исследование образцов лазерной керамики Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Для генерации и усиления коротких импульсов спектр усиления в применяемом лазерном материале должен быть достаточно широким. Одними из перспективных материалов для изготовления активных элементов высокоэффективных лазеров являются полторные оксиды редкоземельных металлов с кубической симметрией R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (R = Sc, Y, Lu и др.), активированные ионом Yb<sup>3+</sup>. Полторные оксиды редкоземельных металлов характеризуются большим коэффициентом теплопроводности, лучшими термооптическими свойствами, ответственными за тепловую линзу и термонаведенную деполяризацию, а также более широким спектром усиления [41], чем у широко используемого Yb:YAG.

Исследованы образцы лазерной керамики Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, изготавливаемой научными группами из Института химии высокочистых веществ (ИХВВ) РАН и Института электрофизики (ИЭ) УрО РАН. Важной особенностью данных образцов являлось то, что обе группы использовали оксид лантана в качестве спекающей добавки. Такая легирующая добавка значительно повышает однородность спекания и, как следствие, оптическое качество образцов. В рамках исследований коллегами было изготовлено несколько серий образцов, отличающихся, в основном, последовательным уменьшением потерь излучения на рассеяние и повышением оптического качества материала. В изготовленных образцах были измерены оптические потери (поглощение и рассеяние), выполнено исследование спектральных характеристик и времени жизни, исследована эффективность лазерной генерации. Основные результаты изложены в работах [A4, A5, A7]. Пропускание исследованных образцов составляло ~82.5 %, что достаточно точно (с погрешностью ±0.5 %) совпадает с теоретическим значением пропуска-

ния для данного материала. При этом, часть проходящего излучения, как правило, рассеивается в малом угле. Потери на рассеяние составляли  $\sim 0.7$  см $^{-1}$ . Измерены коэффициенты поглощения и показано, что образцы Yb:(La)Y $_2$ O $_3$  подвержены нелинейному поглощению из возбужденного состояния. Также измерено время жизни верхнего лазерного уровня (оно составило  $\sim 0.85$  мс) и спектр сечения усиления (рис. 4).

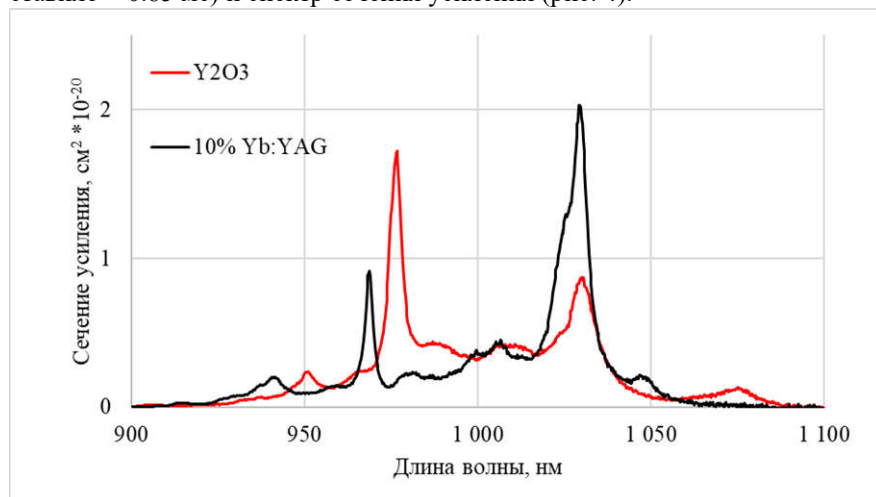


Рис. 4. Спектры сечения усиления в образцах Yb:(La)Y $_2$ O $_3$  и Yb:YAG.

Выполнены исследования эффективности лазерной генерации в образцах Yb:(La)Y $_2$ O $_3$  с использованием дисковой геометрии активного элемента. Дифференциальная эффективность генерации в режиме импульсной накачки достигала 37% в лучших образцах. Максимальная средняя мощность излучения при этом составляла 8 Вт. Результаты выполненных измерений свидетельствуют возможности использования отечественной керамики Yb:(La)Y $_2$ O $_3$  в качестве активных элементов. При этом, основными недостатками являлись относительно большое остаточное рассеяние, а также наличие нелинейного тепловыделения, связанного с примесями в исследуемых образцах.

Выполнены измерения времени жизни и спектра люминесценции в образцах полутороксидной керамики Yb:Y $_2$ O $_3$ , Yb:Lu $_2$ O $_3$ , Yb:Sc $_2$ O $_3$  в диапазоне температур 80-293 К [42]. Согласно результатам измерений, время релаксации верхнего лазерного уровня при охлаждении меняется слабо. При комнатной температуре ширина спектра усиления полутороксидных керамик в  $\sim 1.5$  раза шире, чем в Yb:YAG, а при криогенном охлаждении до 80 К ширина спектра полутороксидных керамик остается широкой и сужается до  $\sim 4$  нм. Соответственно, полутороксидная керамика

может обеспечивать усиление импульсов фс длительности как при комнатной так и криогенной температурах.

## **Глава 2. Оптимизация геометрии активных элементов иттербиевых лазеров**

### **2.1 Активные элементы тонкостержневой геометрии для усиления фемтосекундных импульсов**

Комбинация волоконного фемтосекундного лазера с твердотельным оконечным усилителем является одним из наиболее перспективных путей создания простых, стабильных и надежных фемтосекундных лазеров с мДж уровнем энергии в импульсе и высокой средней мощностью (десятки и более Вт). Такие лазерные системы востребованы в обработке материалов, а также актуальны в качестве стартовой части более мощных лазерных установок. При этом, твердотельные усилители должны обеспечивать большое усиление (с мкДж уровня до мДж), быть простыми и надежными в использовании и не подверженными тепловым эффектам. Одним из перспективных подходов решения этой задачи является разработка твердотельного усилителя на основе тонкостержневого активного элемента [9]. Небольшой диаметр активного элемента (менее 1 мм) позволяет обеспечивать эффективный теплоотвод, а его длина (несколько см) в сочетании с высокояркой диодной накачкой позволяет достигать большой величины усиления за 1 проход через активный элемент. Продемонстрировано более 2 мДж энергии в импульсе [43] и более 160 Вт средней мощности [44] при усилении сигнала в тонкостержневых Yb:YAG активных элементах. Однако, при усилении излучения волоконных фемтосекундных лазеров, главным недостатком Yb:YAG активных элементов является недостаточно широкая полоса усиления, что не позволяет сохранить длительность импульсов в диапазоне 200-300 фс. Поэтому актуальной задачей является разработка таких же надежных и высокоэффективных усилителей как тонкостержневые элементы Yb:YAG, но с большей шириной полосы усиления. Наилучшими лазерными средами для этой задачи могут являться Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> благодаря широкой полосе усиления и высокой теплопроводности. Однако, они не могут быть изготовлены путем микровытягивания [45] как тонкостержневые элементы Yb:YAG.

Разработана технология изготовления тонкостержневых активных элементов диаметром 1 мм и длиной до 40 мм напрямую из объемной заготовки кристалла Yb:YAG [A10, A11, A13] без применения метода микровытягивания. Полировка боковой поверхности обеспечивает волноводно распространение накачки, а оригинальный способ охлаждения позволяет работать при предельно высокой тепловой нагрузке такого тонкостержневого активного элемента. Внешний вид активного элемента и изготовленного на

его основе усилительного модуля представлены на рис. 5. Изготовленные усилительные модули обеспечивают рекордное для твердотельных иттербиевых усилителей усиление за один проход в режиме слабого сигнала (более 11 раз, рис. 6), а также очень высокую оптическую эффективность при усилении сильного сигнала. В двухпроходной схеме усиления продемонстрировано усиление фемтосекундных импульсов со спектрально ограниченной длительностью 280 фс до мДж уровня энергии. Средняя мощность излучения увеличена с 5 до 50 Вт. При усилении chirпированных нс импульсов волоконного фемтосекундного лазера продемонстрировано усиление до 30 дБ в 4-х проходной схеме усилителя, что сравнимо с усилением в регенеративных усилителях [A2] (рис. 6). Ширина спектра усиленного импульса составила 1.5 нм, а длительность, после его компрессии, была близка к спектрально ограниченной и равнялась 0.9 пс [A29].

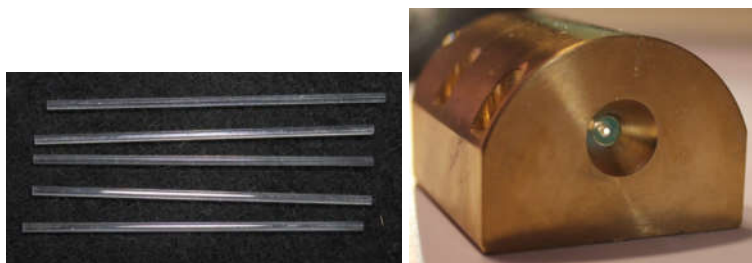


Рис. 5. Внешний вид тонкостержневого активного элемента (слева) и изготовленного на его основе усилительного модуля (справа).

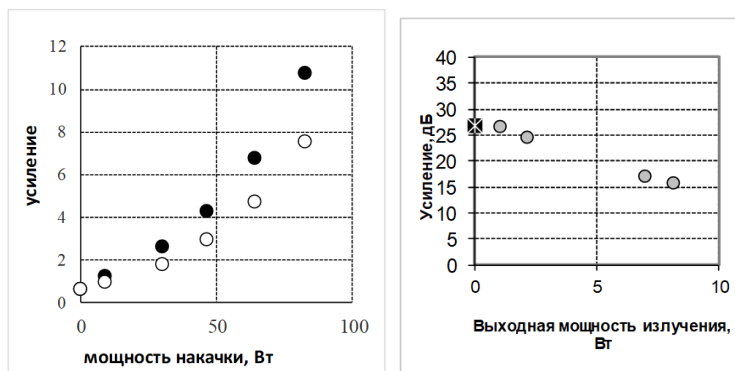


Рис. 6. Усиление узкополосного (черные точки) и 2.5 нм (белые точки) слабого сигнала в тонкостержневом активном элементе (слева) и усиление сильного широкополосного сигнала в 4-х проходной схеме (справа).

Основным недостатком усиления фс импульсов в кристалле Yb:YAG, как и было отмечено выше, является слишком узкая полоса усиления. В результате, при усилении импульсов на 2-3 порядка ширина спектра составляет не более 1.5 нм по полувысоте. С использованием аналогичной технологии изготовления и монтажа созданы и исследованы аналогичные тонкостержневые усилительные модули на основе активных сред Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> [A12]. Из-за более низкого сечения усиления у этих более широкополосных сред усиление за проход значительно ниже чем в Yb:YAG в аналогичных условиях (особенно, для Yb:CaF<sub>2</sub>). При усилении сигнала фемтосекундного сигнала в тонкостержневом активном элементе из Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> продемонстрировано усиление средней мощности с 3 Вт до 15 Вт при частоте повторения импульсов 15 кГц. Ширина спектра усиленного импульса составила 5.5 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности 200 фс (рис. 7). Выполнены исследования сравнения тонкостержневых усилительных модулей на основе Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> в режиме регенеративного усиления. В этом случае сильная разница в сечении усиления может быть компенсирована путем увеличения проходов излучения. С применением трех вышеперечисленных усилительных модулей продемонстрировано усиление чирпированных фемтосекундных импульсов волоконного лазера с суб-мкДж уровня до энергии ~ 200 мкДж при частоте повторения импульсов 11 кГц. При усилении в модуле с Yb:YAG спектр исходного 8 нм сигнала сужается до 1.4 нм (рис.7), что соответствует спектрально ограниченной длительности в ~800 фс и хорошо коррелирует с результатами в 4-хпроходном усилителе. Согласно рис. 4, ширина спектра сечения усиления в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> примерно в 1.5 раза больше, чем в Yb:YAG, что сохраняется и при усилении. Спектр усиленного сигнала в лазерном модуле с Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составил 2.2 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности в ~500 фс. В тонкостержневом активном элементе Yb:CaF<sub>2</sub> продемонстрирована ширина полосы усиления 4.5 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности в ~240 фс. Таким образом, широкополосные иттербиевые среды Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Yb:CaF<sub>2</sub> обеспечивают значительное продвижение в фс диапазон длительностей (по сравнению с Yb:YAG) при усилении сигнала волоконных фс лазеров.

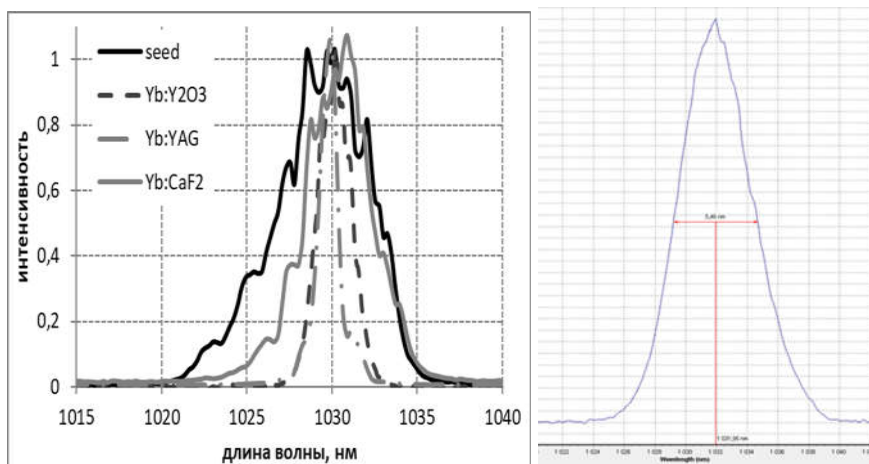


Рис. 7. Спектральное распределение задающего излучения и усиленного регенеративным способом излучения в  $\text{Yb:YAG}$ ,  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  и  $\text{Yb:CaF}_2$  (слева), а также спектр усиленного до 15 Вт сигнала в 2-проходном усилителе на основе тонкостержневого активного элемента из  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  (справа).

## 2.2 Оптимизация дисковой геометрии для приложений с высокой средней мощностью

Основным недостатком тонкостержневой геометрии является малая рабочая апертура, что не позволяет использовать такие активные элементы при создании высокоэнергетических лазеров. Одним из наилучших решений в области высокомоощных лазеров являются дисковые лазеры, обеспечивающие комбинацию высокой средней мощности, высокой эффективности, хорошего качества пучка и большой апертуры. На сегодняшний день достигнута чрезвычайно высокая средняя мощность генерации излучения в дисковых лазерах, в том числе, включая излучение дифракционного качества. Однако, основными ограничивающими факторами дополнительного улучшения лазерных характеристик по-прежнему являются тепловые эффекты, усиленное спонтанное излучение, оптическое качество используемых материалов, доступные технологии охлаждения активных элементов. Для исследований в данной области разработана оригинальная технология изготовления дисковых квантронов, включая оптимизацию геометрии активного элемента, его охлаждение и многопроходную накачку [A15, A16].

При разработке выполнено исследование эффекта нелинейного дополнительного тепловыделения в высоколегированных образцах [A1], 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 путем численного совместного решения уравнения теплопроводности и балансных уравнений, а также с учетом эффекта усиленного спонтанного излучения. Показано, что оптимальная величина легирования в материале Yb:YAG составляет около 7% и при таком легировании толщина активного элемента должна составлять не более 0,4 мм для обеспечения эффективного охлаждения объема активного элемента и не менее 0,2 мм для уменьшения влияния эффекта УСИ и во избежание чрезмерного усложнения оптической схемы накачки. Внешний вид квантрона изображен на рис. 8. В непрерывном режиме работы дифференциальная эффективность многомодовой лазерной генерации в резонаторе с дисковым квантроном составила 60% с выходной лазерной мощностью 600 Вт и ограничивалась лишь доступной мощностью накачки. С использованием 2-х квантронов в резонаторе достигнут кВт уровень средней мощности (рис. 9). Переход к маломодовой генерации в дисковом лазере усложнен большой апертурой активной области (в результате, длина одномодового резонатора становится очень большой). Для решения этой проблемы разработан оригинальный дизайн неустойчивого резонатора [A17].

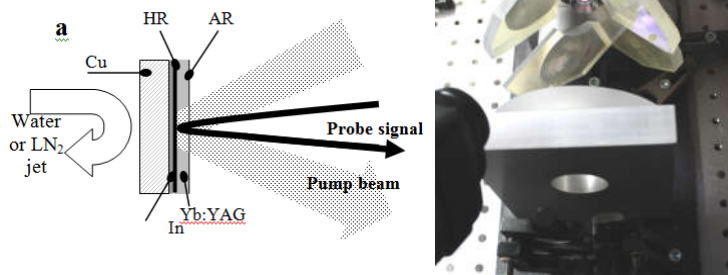


Рис. 8. Оптическая схема (слева) и внешний вид (справа) дискового квантрона.

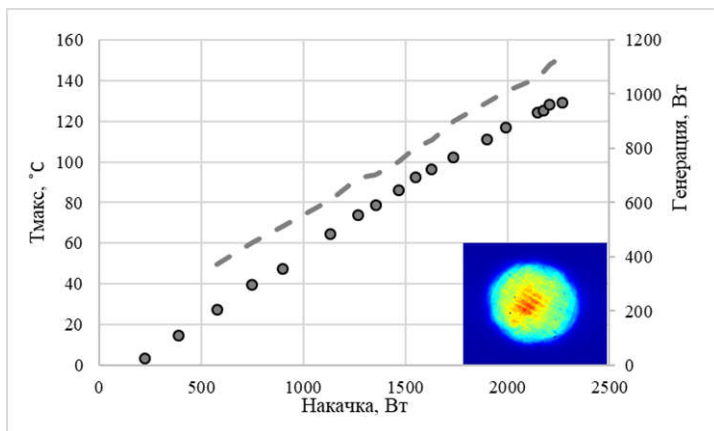


Рис. 9. Зависимость мощности лазерной генерации (точки) и максимальной температуры активных элементов (пунктирная линия) от суммарной мощности накачки в лазерном резонаторе с 2-мя дисковыми квантронами

### 2.3 Создание и применение композитных дисковых активных элементов высокоэнергетических усилителей.

Из-за малой толщины дискового активного элемента усиление за одно отражение крайне мало и не превышает 20% при непрерывной накачке. Кроме того, важным недостатком дисковой геометрии активных элементов является сильный эффект усиленного спонтанного излучения (УСИ), поскольку толщина диска значительно меньше его диаметра [46]. В результате, запасание энергии в таком активном элементе крайне неэффективно, а извлечение энергии затруднено малым коэффициентом усиления. Частично этот недостаток можно устранить, применяя композитный дисковый активный элемент. Его геометрия позволяет выводить часть люминесценции из инверсной области благодаря отсутствию полного внутреннего отражения на границе между легированной и нелегированной частями активного элемента (рис. 10) [47].



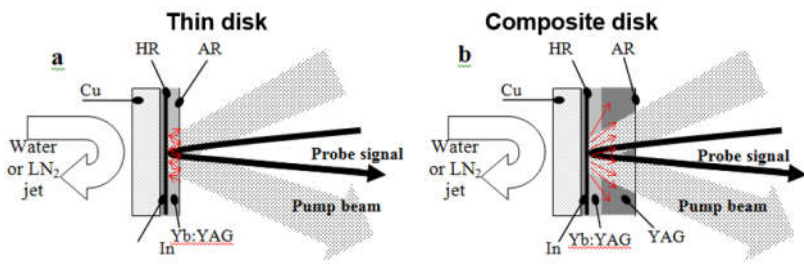
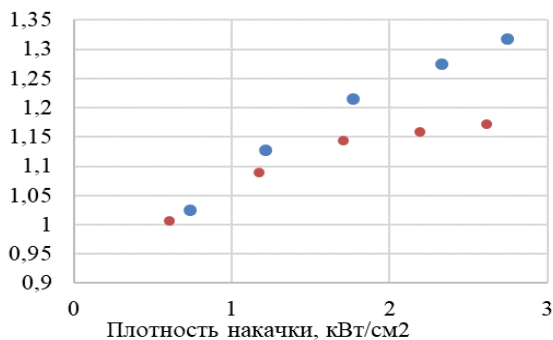


Рис. 10. Сравнение геометрии дискового и композитного дискового активных элементов (красными стрелками схематично указано распространение люминесценции).

Для повышения функциональности дисковых активных элементов при их использовании в высокоэнергетических лазерных системах разработана оригинальная технология термодиффузионной сварки кристаллов Yb:YAG и YAG или Sapphire, позволяющая изготавливать образцы диаметром до 20 мм [A19, A22]. Выполнены исследования их лазерных и термооптических характеристик изготовленных методом термодиффузионной сварки композитных дисковых элементов. Для подтверждения высокого качества термодиффузионного контакта исследована эффективность лазерной генерации в дисковом квантроне с композитным активным элементом [A20-A22]. Достигнута средняя мощность 440 Вт с оптическим КПД 45%, что близко к результатам дискового активного элемента (до 600 Вт с оптическим КПД 50%). Результаты исследований экспериментально подтвердили двукратный рост усиления слабого сигнала (а, следовательно, и запасенной энергии) в композитном дисковом активном элементе при его непрерывной накачке (рис. 11), что хорошо согласуется с выполненными расчетами [A23].



*Рис. 11. Усиление слабого сигнала в дисковом (красные точки) Yb:YAG активном элементе и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активном элементе в зависимости от плотности мощности поглощенной накачки. Измерения выполнены при диаметре пучка накачки 5 мм и толщине легированного слоя 300 мкм.*

Необходимо отметить, что добавление нелегированного слоя к дисковому активному элементу может привести к увеличению тепловых искажений лазерного излучения. Это связано со значительным увеличением оптического пути, через который проходит сигнальное излучение. В работах [A21, A23] выполнены исследования этого эффекта и показано, что при толщине легированного слоя более 300 мкм и при оптимальной толщине нелегированного слоя термооптические искажения (параметр  $M^2$ ) в композитном активном элементе могут быть даже меньше, чем в дисковом. Однако сила тепловой линзы (параболическая часть термонаведенных искажений), все же, остается значительно больше, чем в дисковых активных элементах. Для дополнительного уменьшения термонаведенных искажений излучения разработана технология термодиффузионной сварки разнородных материалов Yb:YAG/Sapphire. Благодаря в  $\sim 3$  раза более высокой теплопроводности сапфира термонаведенные искажения в нелегированной части также пропорционально уменьшаются [A22]. Для дополнительного уменьшения тепловой линзы в композитном дисковом активном элементе выполнены исследования по управлению потоками тепла, которые демонстрируют возможность полного подавления тепловой линзы в композитном дисковом активном элементе [23].

Усиление лазерных импульсов в дисковых активных элементах, даже при использовании композитной структуры, возможно только с применение многопроходных схем усиления [48]. Учитывая, что величина усиления за одно отражение не превышает десятков процентов, для усиления сигнала даже в несколько раз необходимо реализовать десятки проходов сигнала через активный элемент. Поэтому, актуальной становится задача оптимизации оптической схемы усиления. На основе доработки многопроходной телескопической схемы разработан оригинальный способ значительного увеличения количества проходов через дисковый активный элемент [A18]. С применением доработанной 32-проходной схемы продемонстрировано усиление слабого сигнала до 200 раз и средняя мощность до 50 Вт на выходе многопроходного Yb:YAG дискового усилителя (рис. 12). Энергия в импульсе составила 5 мДж, что значительно превосходит максимальную энергию, которую можно извлечь из тонкостержневого активного элемента.

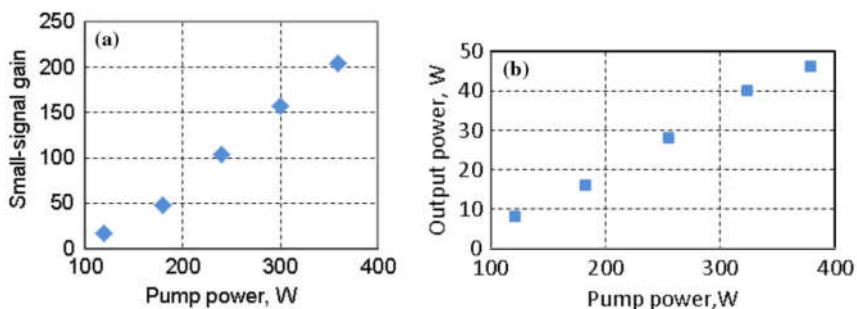


Рис.12. Зависимости усиления слабого сигнала и выходной мощности при наличии сильного сигнала от мощности накачки в 32-проходном дисковом усилителе.

В качестве альтернативного способа извлечения энергии из дискового активного элемента рассмотрена возможность регенеративного усиления методом СРА. На выходе регенеративного усилителя также достигнута энергия 5 мДж после компрессии этого сигнала до длительности 20 пс с помощью объемной брэгговской решетки [49]. Также рассмотрена возможность усиления в дисковых активных элементах в условиях импульсной накачки с большой скважностью. Это позволяет значительно увеличить толщину активного элемента и, соответственно, усиление за проход и величину запасенной энергии. При усилении в 8-проходной схеме достигнута энергия в импульсе 90 мДж с частотой повторения импульсов 50 Гц [49].

### Глава 3. Криогенный дисковый лазер с высокой средней и пиковой мощностью.

Ион иттербия характеризуется небольшим квантовым дефектом (~9%) и отсутствием поглощения из возбужденного состояния. Довольно большое время жизни этого состояния позволяет, несмотря на малую пиковую мощность диодной накачки, обеспечивать большую запасенную энергию, сравнимую с энергией, запасаемой в возбужденных ионах Nd при ламповой накачке. Благодаря высокому легированию, дисковые лазеры на ионах Yb могут иметь высокую эффективность при большой средней мощности. Отвод тепла от торца диска дает возможность эффективно решать задачу охлаждения, а высокая концентрация ионов Yb обеспечивает поглощение накачки.

Но, как было отмечено выше, дисковая геометрия активного элемента Yb:YAG имеет недостатки при создании иттербиевых лазеров с большой энергией в импульсе. Энергии основного и нижнего лазерного уровней иона Yb различаются незначительно. Поэтому при комнатной температуре

на нижнем лазерном уровне Yb находится примерно 5 % от общего числа ионов, что приводит к появлению достаточно высокого порога инверсии при накачке активного элемента. Другой важный недостаток иона Yb – небольшое сечение усиления в сочетании с малой длиной взаимодействия в дисковом активном элементе приводит к крайне малому коэффициенту усиления. Этот недостаток, к тому же, дополняется сильным эффектом УСИ. Поэтому для дисковых иттербиевых лазеров чрезвычайно перспективным является охлаждение активной среды до криогенных температур (80 – 200 К). При охлаждении нижний лазерный уровень опустошается, и лазерная среда становится четырехуровневой, увеличиваются сечения усиления и поглощения [30, 50], а также коэффициент теплопроводности [33]. При этом значительно уменьшаются поляризационные и фазовые искажения за счет изменения оптических характеристик кристалла [51]. Увеличение теплопроводности, в свою очередь, позволяет значительно увеличить толщину дискового активного элемента, ослабляя эффект УСИ.

Для оценки эффективности применения криогенного охлаждения был выполнен расчет запасенной энергии и усиления в дисковых и композитных дисковых активных элементах при непрерывной накачке (рис. 13) [52]. Видно, что при комнатной температуре активного элемента эффективное запасание энергии возможно только в композитном активном элементе. При охлаждении до криогенных температур, за счет роста теплопроводности, появляется возможность значительного увеличения толщины активного элемента и снижения эффекта УСИ в обычном дисковом активном элементе. Кроме того, при криогенных температурах значительно больше усиление, что облегчает извлечение запасенной энергии из активного элемента.

Для оценки эффективности криогенного охлаждения выполнены расчеты усиления и запасенной энергии в дисковых активных элементах в условиях непрерывной накачки (рис. 13) [A23]. Видно, что при комнатной температуре эффективное запасание энергии возможно только в композитном дисковом активном элементе. При криогенных температурах за счет более высокой теплопроводности можно увеличивать толщину активного элемента, снижая тем самым влияние эффекта УСИ, поэтому эффективность применения композитной геометрии дискового активного элемента снижается. Также, при переходе к криогенным температурам значительно растет коэффициент усиления слабого сигнала как за счет роста сечения усиления так и благодаря увеличению запасенной энергии. Это значительно облегчает извлечение запасенной энергии. Следует отметить, что при криогенном охлаждении кристаллов Yb:YAG оптимальной с точки зрения запасания энергии является температура около 130 К, поскольку при дальнейшем охлаждении рост сечения усиления приводит к чрезмерному увеличению УСИ вне зависимости от геометрии активного элемента.

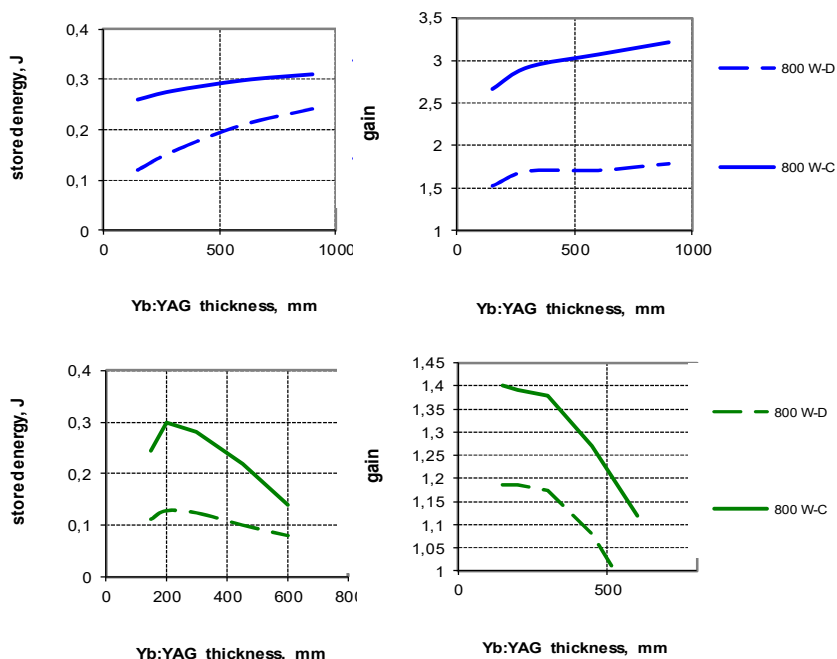


Рис.13. Зависимости запасенной энергии (слева) и усиления слабого сигнала (справа) от толщины легированного слоя в композитных (сплошные линии) и дисковых (пунктирные линии) активных элементах при температурах охлаждения 80 К (сверху) и 293 К (снизу). Расчеты выполнены для 800 Вт средней мощности накачки и диаметре пучка 5 мм.

### 3.1. Лазерный усилитель с кристаллическими активными элементами.

Для создания лазерных источников с одновременно высокой средней и пиковой мощностью выполнен ряд исследований по усилению наносекундных лазерных импульсов в криогенно охлаждаемых дисковых активных элементах. В качестве активной среды был выбран кристалл Yb:YAG, поскольку он может быть изготовлен с наилучшим качеством, обеспечивая близкие к теоретическим оптические и лазерные характеристики. Разработана экспериментально верифицированная теоретическая модель расчета усиления и запасенной энергии в дисковых и композитных дисковых активных элементах с учетом температурных зависимостей основных термооптических и лазерных характеристик, а также эффекта УСИ [53]. Показано, что оптимальная толщина активного элемента составляет  $\sim 0.8$  мм и не может быть значительно увеличена из-за термонаведенных эффектов. При

этом, усиление и эффективность запасаения энергии сильно уменьшаются при увеличении диаметра накачки. Применение композитной геометрии активного элемента позволяет частично уменьшить влияние УСИ и увеличить коэффициент усиления. Особенностью Yb:YAG при охлаждении до криогенных температур является обужение спектра усиления и его смещение в коротковолновый диапазон [51], что необходимо учитывать при создании задающих лазеров криогенных Yb:YAG усилителей. В рамках исследований использовалось 2 подхода. На ранних этапах исследований был разработан задающий Yb:YAG генератор работающий в режиме модуляции добротности с разгрузкой резонатора [A26, 54, 55]. Такой подход позволял формировать лазерные импульсы длительностью 5-10 нс с энергией в импульсе более 1 мДж и частотой их повторения до 10 кГц. Для совмещения длин волн излучения генератора и криогенных усилителей активный элемент задающего генератора либо охлаждался жидким азотом [54], либо спектр излучения смещался поляризационным фильтром Вуда [A26]. В заключительной части исследований криогенных лазеров в качестве задающего источника использовался волоконный фемтосекундный лазер со стретчированием импульса до ~ 2 нс объемными брэгговскими решетками и последующим усилением сигнала до ~ мДж уровня в регенеративном усилителе [A12, A27]. Такой подход позволял исследовать спектральные характеристики криогенных усилителей с возможностью компрессии усиленных импульсов в пс диапазон длительностей.

### **Охлаждение и дизайн активного элемента криогенного дискового лазера.**

Для криогенного охлаждения активных элементов использовались вакуумные криостаты с жидким азотом. Активные элементы размещались на медной шайбе, охлаждаемой с одной стороны жидким азотом, а с другой – в вакуумной части криостата. Дисковый активный элемент, работающий по схеме активного зеркала, с задней части металлизировался и монтировался на медную шайбу пайкой индием. Одной из особенностей жидкого азота является то, что его температура близка к температуре кипения. При значительной тепловой нагрузке на активный элемент, медный теплоотвод прогревается, что приводит к кипению азота в области соприкосновения. В результате, эффективность теплообмена сильно падает. Для решения этой проблемы разработана проточная система охлаждения дисковых активных элементов жидким азотом [54], что позволило более чем в 3 раза (до 150 Вт) повысить тепловую нагрузку дисковых активных элементов (рис. 14). Также выполнено сравнение коэффициента усиления в дисковом и композитном дисковом активных элементах при криогенных температурах (рис.15). Видно, что композитный активный элемент обеспечивает значительно большее усиление, что демонстрирует его преимущества и при криогенных температурах.

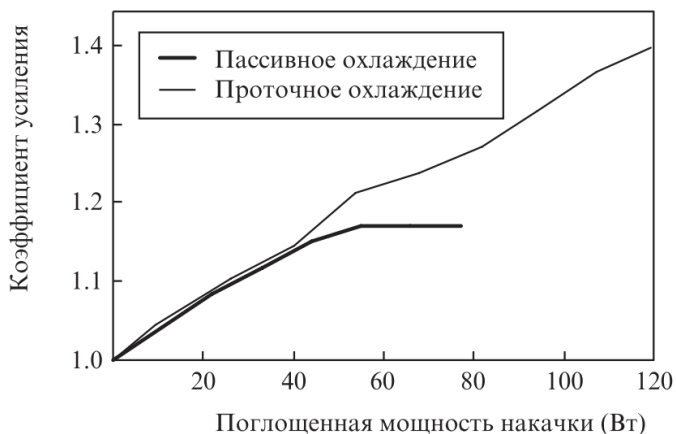


Рис. 14. Зависимость коэффициента усиления в режиме малого сигнала от поглощенной мощности накачки при проточном и пассивном охлаждении активного элемента.

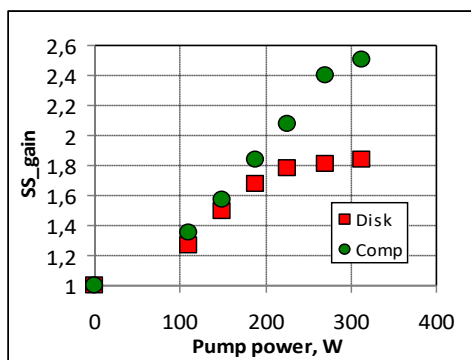


Рис. 15. Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от поглощенной мощности накачки в композитном (зеленые точки) и дисковом (красные точки) активных элементах.

### Лазерная система с усилением до 120 мДж при суб-кГц частоте повторения импульсов.

Разработана лазерная система с криогенным охлаждением дисковых Yb:YAG активных элементов [54]. Оптическая схема задающего источника и предварительного усилителя представлена на рис. 16. 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. Другим важным преимуще-

ством такой схемы является возможность компенсации тепловой линзы в композитном дисковом активном элементе, что важно для юстировки оптической схемы. На выходе из предварительного усилителя энергия в импульсе составляла до 30 мДж при частоте повторения 1 кГц.

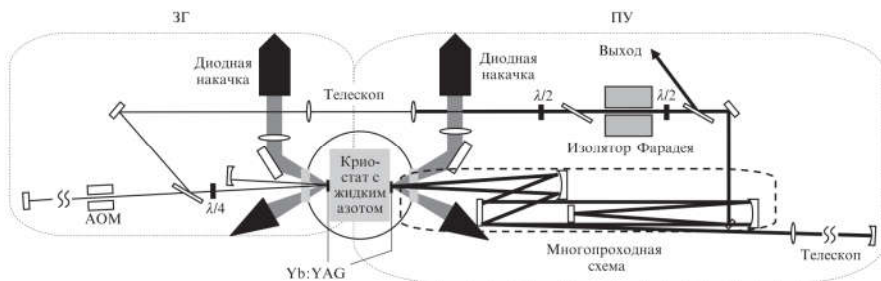


Рис. 16. Принципиальная оптическая схема задающего источника и предусилителя.

После выхода из предварительного усилителя сигнал направлялся в основной усилитель, оптическая схема и внешний вид которого представлена на рис. 17. После изолятора Фарадея и пространственной фильтрации на вход в основной усилитель приходило до 20 мДж энергии в лазерном импульсе. К сожалению, оптическая схема основного усилителя не позволяла использовать композитные активные элементы из-за сильной (по сравнению с дисковыми АЭ) тепловой линзы, приводящей к сильным изменениям диаметра пучка. 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 [54] и до 90 мДж при 1 кГц частоте повторения [56] (рис. 18). Достигнута 15% оптическая эффективность оконечного усилителя. Ограничением роста энергии в импульсе при уменьшенной частоте повторения являлось УСИ в дисковых активных элементах, а при непрерывной накачке и 1 кГц частоте повторения основным ограничивающим фактором было закипание жидкого азота в проточной системе охлаждения. Ширина спектра усиленного сигнала составила при этом не более 0.7 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности 1.5 пс.



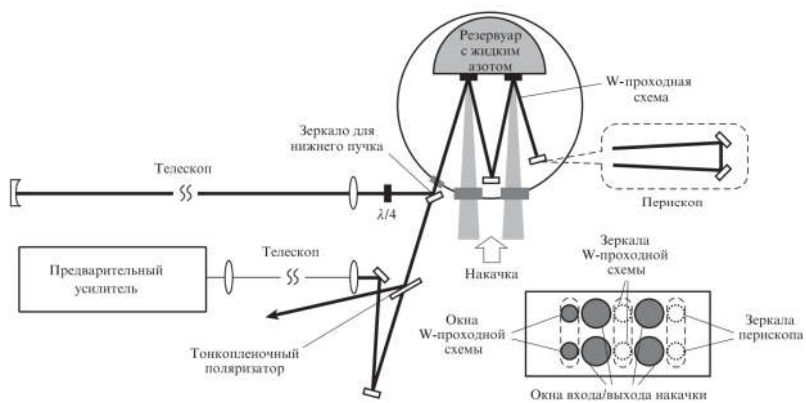


Рис. 17 Принципиальная оптическая схема задающего источника и предусилителя (сверху) и его внешний вид (снизу).

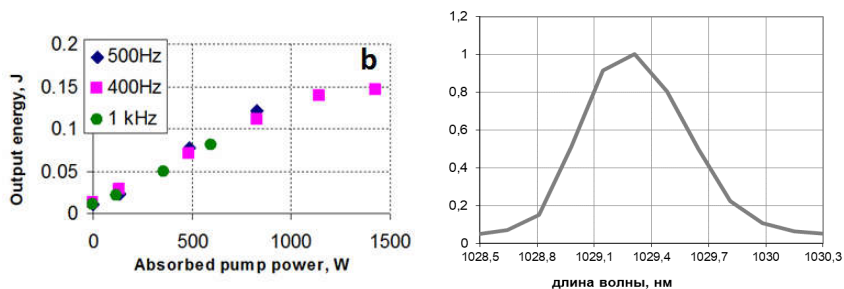


Рис. 18. Зависимость выходной энергии основного усилителя криогенного дискового лазера от мощности накачки при разных частотах повторения усиливаемого импульса.

Основным недостатком созданного криогенного дискового лазера является чрезмерная сложность работы с жидким азотом. В частности, его активное кипение приводит к значительным вибрациям конструкции криостата и, как следствие, нестабильности углового направления усиливаемого лазерного пучка. Для повышения технологичности изготовления криогенных дисковых лазеров предложено перейти от охлаждения жидким азотом к охлаждению криогенно охлажденной жидкостью с температурой, близкой к замерзанию, например, этиловым спиртом при температуре 190 К [57]. Такой подход позволит использовать основные преимущества криогенного охлаждения, но значительно облегчит эксплуатацию лазерной установки, поскольку рефрижераторные термостаты на данный диапазон температур являются коммерческим продуктом. В работе [57] представлены теоретические расчеты по созданию мультидискового квантрона с использованием этилового спирта в качестве охлаждающей жидкости. Показано, что в предложенной геометрии эффект УСИ значительно слабее чем в дисковых АЭ по схеме активного зеркала, что обеспечивает большое усиление и запасенную энергию. При этом, эффективность охлаждения позволит работать в режиме импульсной накачки с частотой повторения сотни Гц.

### **3.2. Лазерный усилитель с керамическими активными элементами.**

При масштабировании высокоэнергетических иттербиевых лазеров в диапазон энергий десятки и сотни Дж на первый план выходит использование керамических лазерных сред для активных элементов из-за возможности ее изготовления с большой апертурой. При этом, Yb:YAG керамика обладает оптическим качеством, максимально близким к монокристаллическим элементам и продемонстрировано ее изготовление с апертурой до 10 см [58]. В связи этим, в криогенном дисковом лазере выполнены дополнительные исследования с заменой Yb:YAG кристаллических элементов на аналогичные керамические. Результаты исследований представлены в работе [A25]. Активные элементы диаметром 20 мм и толщиной 1.4 мм с легированием 5% были изготовлены в лаборатории AMRC Наньянского Технологического Университета Сингапура. Детально описание метода изготовления образцов керамики представлено в работе [59]. Из-за меньшего легирования керамических АЭ по сравнению с кристаллическими, их толщина была увеличена почти в 2 раза для эффективного поглощения накачки. В результате, это привело к более сильным тепловым эффектам и необходимости снизить частоту повторения импульсов накачки и сигнала до 140 Гц в отличие от работы [54]. С другой стороны, увеличенная толщина и диаметр дисковых активных элементов привела к снижению эффекта УСИ, что позволило достичь большей энергии в импульсе. Результаты измерений представлены на рис. 19. Согласно измерениям, усиления слабого

сигнала запасенная энергия в активных элементах достигала 0.4 Дж при энергии накачки 1.4 Дж. При этом, на выходе усилителя энергия в импульсе составила 0.24 Дж, что соответствует  $\sim 17\%$  оптической эффективности усилителя. Повышение оптической эффективности по сравнению с кристаллическими активными элементами связано, в основном, с увеличением толщины АЭ и соответствующим уменьшением эффекта УСИ. Это, в свою очередь, привело к снижению рабочей частоты повторения импульсов.

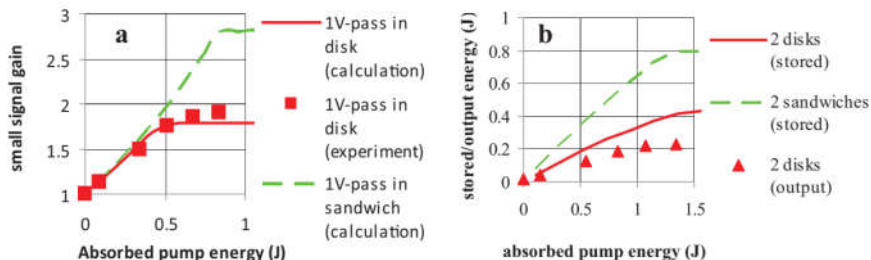


Рис. 19. Теоретическая (линии) и экспериментальная (точки) зависимости усиления слабого сигнала (слева), запасенной и извлеченной энергии (справа) от энергии накачки.

Как было отмечено выше, ширина спектра усиления в Yb:YAG значительно обужается и составляет 1.2 нм по полувысоте при температуре 80 К. При усилении сигнала на несколько порядков происходит дополнительное обужение спектра и его ширина составляет не более 0.7 нм. При такой ширине спектра значительно усложняется реализация усиления ультракоротких импульсов методом CPA, а спектрально ограниченная длительность составляет значительно больше пикосекунды. Для повышения пиковой мощности криогенных лазеров путем усиления лазерных импульсов методом CPA более оптимальные керамические полупрозрачные лазерные среды. Спектр усиления Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> значительно шире как при комнатной так и при криогенной температурах (рис.20) [A24, 51].

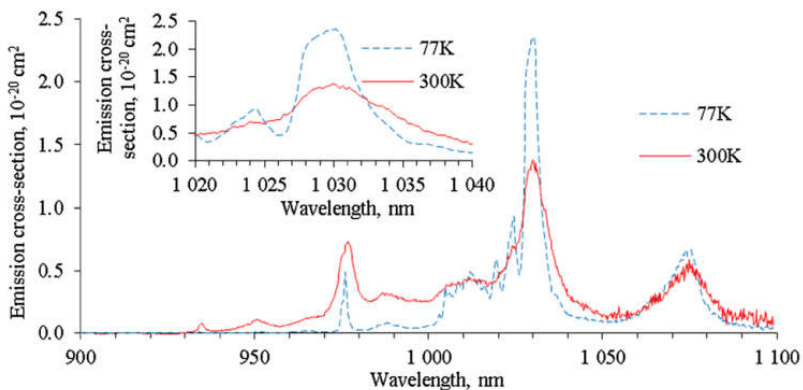


Рис. 20. Спектры сечения усиления  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  при комнатной и криогенной (80 K) температурах.

Выполнены экспериментальные исследования усиления широкополосных (более 1.5 нм) chirпированных лазерных импульсов в криогенно охлаждаемом дисковом активном элементе из  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  [A24]. Излучение фс волоконного иттербиевого лазера стретчировано объемной брэгговской решеткой до длительности 0.5 нс с шириной спектра 2.2 нм, после этого сигнал усилен в  $\text{Yb:YAG}$  тонкостержневом усилителе до средней мощности 4 Вт. Усиление в  $\text{Yb:YAG}$  привело к обузанию спектра до 1.8 нм. Данный сигнал направлен в многопроходный (с использованием телескопической схемы) усилитель с криогенно охлажденный дисковым  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  активным элементом и усилен до 12 Вт (рис. 21). Спектр усиленного сигнала при этом составил не обузился и также составил 1.8 нм, что соответствует спектрально ограниченной длительности импульса 900 фс (при аппроксимации гауссовой функцией).

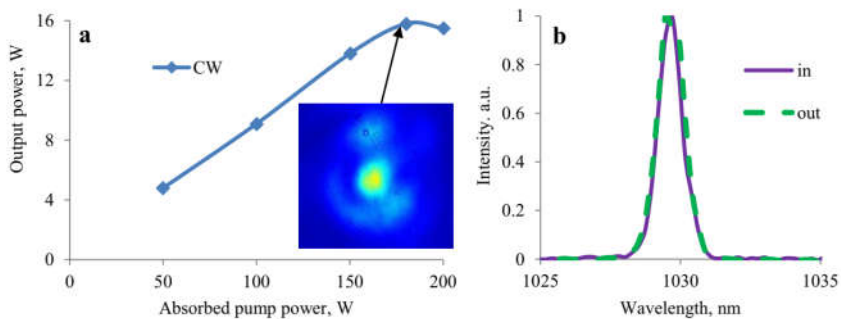


Рис. 21. Зависимость выходной мощности от мощности накачки (слева) и выходной спектр на максимальной мощности (справа).

## **Глава 4. Применение иттербиевых лазеров в стартовой части высокоинтенсивных фс лазерных установок**

Основным приложением мощных иттербиевых лазеров в высокоинтенсивных лазерных установках является накачка лазерного или нелинейного элемента для преобразования энергии в фемтосекундное излучение. Однако, при достижении суб-пс длительности импульсов иттербиевых лазеров открываются дополнительные возможности формирования фс лазерных импульсов, в том числе в различных спектральных диапазонах за счет нелинейных преобразований. Например, в работах [60, 61] от 2017 года предложена и реализована новая схема построения высокомошных фемтосекундных лазеров, основанная на относительно широкой полосе усиления иттербиевых лазеров. Согласно этому новому подходу фемтосекундные импульсы генерируются «напрямую» из пикосекундного лазера накачки путем генерации суперконтинуума, достаточно широкополосного из-за короткой длительности исходного сигнала. Затем, путем последующих параметрических преобразований усиливаются необходимые спектральные компоненты суперконтинуума, а генерация разностной частоты позволяет получать излучение с пассивной стабилизацией фазы огибающей электромагнитного поля [62]. Ниже представлены результаты исследований нелинейного уширения и преобразования излучения иттербиевых лазеров и создание стартовых систем высокомошных фс лазеров на основе этих подходов.

### **4.1 Нелинейное преобразование суб-пс импульсов иттербиевых лазеров в различные спектральные диапазоны с последующей компрессией до фемтосекундной длительности**

Одним из способов значительно уменьшить длительность импульса суб-пс иттербиевого лазера является нелинейная компрессия. Суть метода заключается в использовании для нелинейного взаимодействия оптических элементов, изготовленных из кристаллов, оптического стекла или полимеров для уширения спектра прошедших через них импульсов за счет нелинейного взаимодействия. Далее применяются чирпирующие зеркала, которые позволяют скорректировать спектральную фазу и сжать импульс во времени. В экспериментах такой подход был реализован для лазерного излучения субпетаваттного уровня мощности и продемонстрировано временное сжатие с 64фс до 11фс [63] и с 60 до 10фс [64]. Критически важным элементом в таком методе временного сжатия являются чирпирующие зеркала, и их изготовление является сложной технологической задачей. Поэтому, в последнее время получают развитие методы временного сжатия и без использования чирпирующих зеркал, что актуально, например, для лазеров с высокой энергией в импульсе. Например, в работе [65] рассмотрена возможность временного сжатия инфракрасных (~1 мкм) лазерных им-

пульсов с использованием кристалла KDP за счет различия в знаках дисперсии групповых скоростей GDD и кубической нелинейности. Данное свойство, в сочетании с возможностью изготовить кристалл KDP с апертурой более 40 см, позволит применить его в лазерных установках на основе неодимового стекла для временного самосжатия. Для подтверждения такой возможности выполнены экспериментальные исследования по самосжатию излучения фемтосекундного иттербиевого лазера в кристалле KDP [A28]. Результаты измерений длительности импульса от энергии импульса приведены на рис. 22. Экспериментально продемонстрирована возможность уменьшения длительности в 2.5 раза с 250 до 94 фс. Однако повышение пиковой мощности ограничено слишком большой толщиной кристалла KDP, имеющего значительное поглощение в рассматриваемой спектральной области. 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

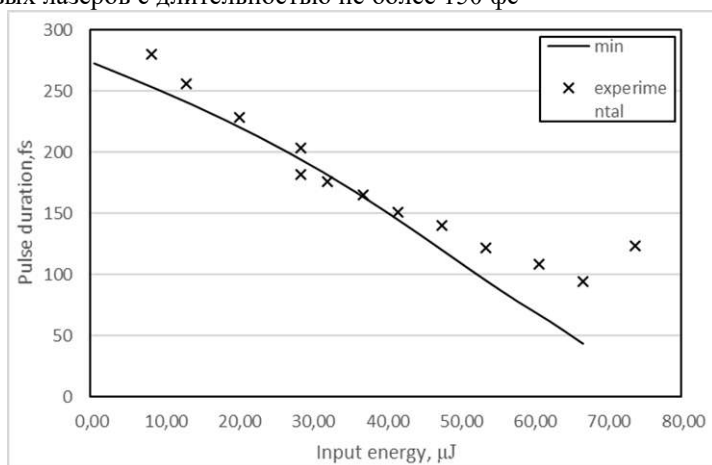


Рис. 22. Зависимость длительности импульса на выходе кристалла KDP от входной энергии. Сплошная линия – теоретическое значение длительности, точки – результаты измерений

Дальнейшее повышение интенсивности излучения при нелинейном взаимодействии может привести к филаментации излучения или, при соблюдении определенных условий, к генерации излучения суперконтинуума, спектр которого составляет более октавы. При этом, часть исходного излучения иттербиевого лазера может быть использована в качестве накачки для спектральных преобразований излучения в кристаллах с квадратичной нелинейностью. Выполнен ряд исследований по формированию фемтосекундного излучения с длительностью в несколько осцилляций и воз-

возможностью перестройки спектра в широком спектральном диапазоне [A29, 25, 27]. Оптическая схема преобразователя представлена на рис. 23. Генерация суперконтинуума от 2-й гармоники излучения иттербиевого лазера обеспечивает широкий спектр излучения, а генерация разностной частоты – перестройку в инфракрасный диапазон. Кроме того, генерация разностной частоты с накачкой 2-й гармоникой обеспечивает пассивную стабилизацию фазы электромагнитных колебаний относительно огибающей [62]. Дальнейшее усиление фундаментальной длины волны (в области 2 мкм) или 2-й гармоники обеспечивает усиление сигнала фемтосекундной длительности до мкДж уровня в спектральном диапазоне 0.6-2.5 мкм (рис. 24). Длительность импульсов составляет 20-35 фс и может быть дополнительно уменьшена.

Описанный выше подход позволяет создавать фемтосекундные лазерные системы с очень гибкими выходными параметрами, и одним из приложений является создание стартовых систем высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных установок. Далее представлены результаты разработки таких стартовых систем.

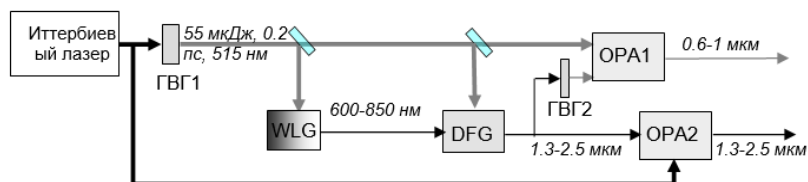


Рис. 23. Функциональная оптическая схема формирования фемтосекундного излучения различных спектральных диапазонов.

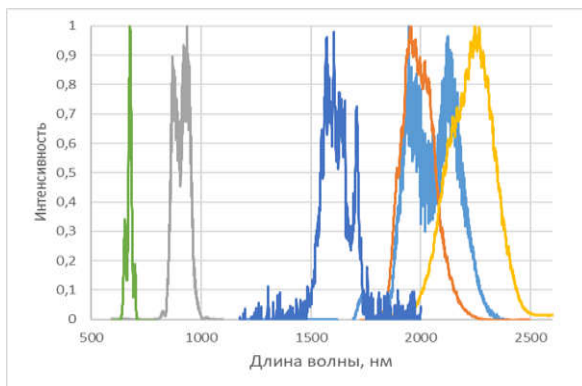


Рис. 24. Спектры излучения после параметрического формирования фс импульсов.

## 4.2 Параметрическое усиление фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны $\sim 2$ мкм

Развитие лазерных источников с экстремально высокой пиковой мощностью излучения в области инфракрасного диапазона является одним из самых перспективных направлений для исследований взаимодействия излучения с веществом. Так, при генерации гармоник высокого порядка, энергия фотонов растет с увеличением длины волны исходного излучения [66], а стабилизация фазы между электромагнитным полем и огибающей позволяет генерировать изолированные аттосекундные импульсы. С увеличением длины волны растет ponderomotive сила, что приводит к более эффективному ускорению электронов [67]. Эффективность генерации терагерцового излучения растет, при увеличении длины волны воздействующего фемтосекундного лазерного излучения, как  $\lambda^5$  [68], а ширина спектра может составлять несколько октав. На сегодняшний день известны только 2 лазерные установки мульти-тераваттного уровня мощности, работающие в инфракрасной области спектра [69]. Причем, обе установки используют высокоинтенсивный фемтосекундный титан-сапфировый лазер для накачки параметрического усилителя, что не оптимально, поскольку можно аналогичным образом использовать иттербиевые пикосекундные лазеры [70], обладающие высокой энергией в импульсе при частоте повторения в десятки и сотни герц и гораздо более дешевые и простые в применении.

На основе фемтосекундных и пикосекундных иттербиевых лазеров разработана стартовая часть фемтосекундной лазерной системы 2-мкм спектрального диапазона с мульти-ТВт пиковой мощностью [26]. Выполнены исследования параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны  $\sim 2$  мкм и накачкой пикосекундными импульсами иттербиевого лазера. Функциональная схема лазерной системы представлена на рис. 25. В качестве единого источника излучения выступает коммерческий суб-пикосекундный иттербиевый лазер, состоящий из волоконного источника с частотой повторения импульсов 60 МГц и усилителя импульсов до энергии 0.3 мДж с частотой повторения до 15 кГц и длительностью 250 фс. Усиленный сигнал используется для генерации широкополосного фемтосекундного излучения в области 2 мкм на основе описанных в разделе 4.1 подходов. Достигнута энергия в импульсе до 25 мкДж с длительностью менее 30 фс, что соответствует  $\sim 4$  осцилляциям электромагнитного поля (рис. 26). Один из импульсов 60 МГц последовательности с частотой 60 МГц направляется в разрабатываемые иттербиевые дисковые усилители и усиливается для дальнейшего использования в качестве накачки. В дисковом усилителе сигнал накачки усилен до 100 мДж и продемонстрирована возможность его компрессии до 25 пс (рис. 27).



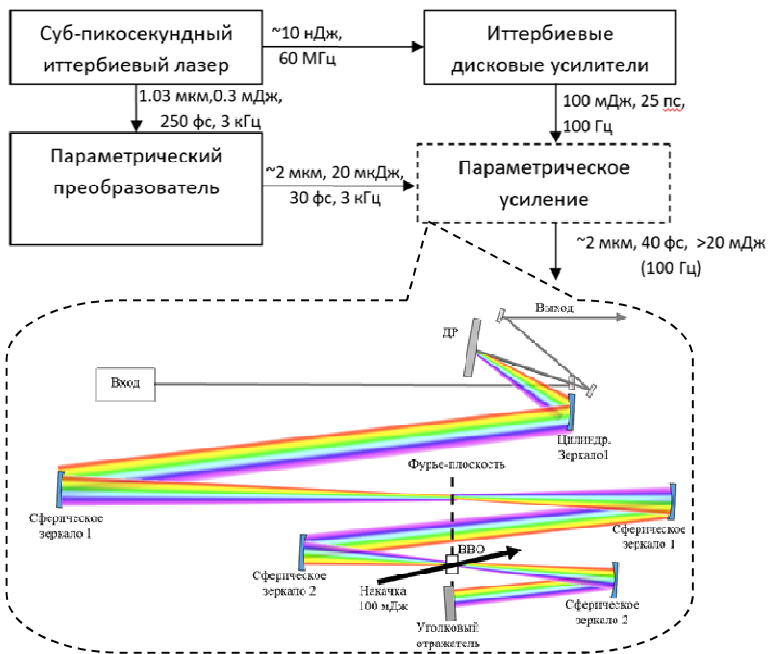


Рис. 25. Функциональная схема 2-мкм лазерной системы. Пунктиром указан разрабатываемый узел параметрического усиления в спектральном домене (FOPA).

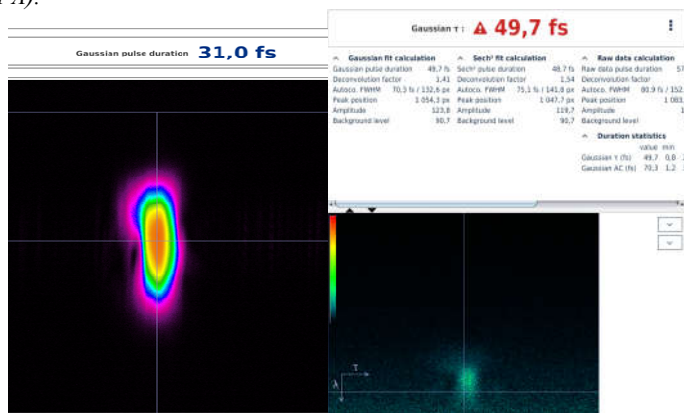


Рис. 26. Автокорреляционная функция, измеренная методом FROG на входе в FOPA (слева) и на выходе (справа).

Для дальнейшего параметрического усиления оптимизирован недавно предложенный подход параметрического усиления в фурье-плоскости дис-

персионной схемы с нулевой дисперсией (High Gain Frequency Domain Optical Parametric Amplification (FOPA)) (рис. 25) [71]. Основными достоинствами нового метода являются: комбинация системы стретчер-компрессор с полным согласованием дисперсии в одной схеме с усилителем, а также отсутствие необходимости временного профилирования импульса для равномерного усиления во всем спектральном диапазоне. Выполнены расчеты модификации данного метода усиления для использования относительно длинных (более 10 пс) импульсов накачки иттербиевого лазера вместо фемтосекундных импульсов Ti:Sa лазера. Предложена замена сферических зеркал на цилиндрические, а дифракционная решетка с 600 штрихов/мм является одной из наиболее подходящих для растяжения импульса до длительности  $\sim 15$  пс внутри усилителя. Такая дифракционная оптическая схема собрана и продемонстрирована ее эффективная работа с 50 фс длительностью импульсов на выходе (рис. 26) и оптическом пропускании 60%. В дальнейшем, планируется установка нелинейного кристалла и параметрическое усиление с использованием 100 мДж накачки. В результате, при эффективности преобразования  $>20\%$  энергия фемтосекундных импульсов может быть усилена до 20 мДж, что, при компрессии в спектрально ограниченную длительность составит 0.4 ТВт пиковой мощности, что близко к рекордным на сегодняшний день значениям в ИК-диапазоне.

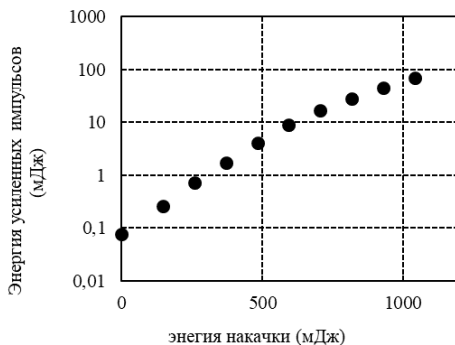


Рис. 27. Зависимость выходной энергии от энергии импульсов накачки многопроходного дискового усилителя

### 4.3 Новая стартовая часть петаваттной лазерной установки PEARL

Первым лазером ПВТ уровня, построенным на основе ОРСРА, является лазерная система PEARL, на которой в 2007 году продемонстрирована пиковая мощность 0.56 ПВт [72]. С того времени данная установка активно используется для исследований как в области лазерной физики, так и в области взаимодействия излучения с веществом. Получен ряд значимых научных результатов [73-75]. Дальнейшее развитие данной установки - внедрение узла СаfСА (для дополнительного уменьшения длительности импульса) и деформируемого зеркала (для улучшения качества фокусировки излучения). Оптимизация лазера накачки также требует значительного улучшения таких параметров как стабильность и повторяемость лазерных импульсов.

Упрощенная функциональная схема лазерного комплекса PEARL представлена на рис. 28. Фемтосекундный сигнал генерируется Cr:forsterite (или Ti:Sapphire) осциллятором, растягивается (для каждого осциллятора свой, согласованный с компрессором стретчер [76, 77]) и направляется в первый каскад параметрического усиления (ОРА1). Далее сигнал усиливается во 2-м каскаде параметрического усиления (ОРА2) до ~30 мДж и до максимальной энергии 15-20 Дж в 3-м каскаде (ОРА3). Параметрические усилители ОРА1 и ОРА2 обеспечивают 60 фс импульсы ТВТ уровня пиковой мощности на выходе компрессора при накачке 2-й гармоникой излучения Nd:YLF лазерного усилителя с частотой повторения импульсов 1 Гц. Для усиления в оконечном каскаде ОРА3 применяется излучение 2-й гармоники 300-Дж Nd:glass лазера, работающего с частотой повторения 1/20 минуты. Излучение, служащее затравкой канала накачки, формируется в одномодовом Nd:YLF генераторе с модуляцией добротности. Данный источник излучает импульсы длительностью ~30 нс из которых, с помощью системы электронной синхронизации, ячейкой Поккельса вырезается импульс длительностью 1.5 нс в момент времени, соответствующий наиболее оптимальному перекрытию сигналов параметрического канала и канала накачки в усилителе ОРА3. Описанная выше оптическая схема имеет ряд недостатков, основным из которых является нестабильность электрической синхронизации между импульсами фс сигнала и накачки. Дополнительными недостатками стартовых узлов комплекса PEARL является слишком узкий спектр излучения фс источника, что ограничивает минимальную длительность фс импульса на выходе оптического компрессора. Нестабильность также вносит ламповая накачка всех неодимовых усилителей канала накачки, которая также ограничивает максимальную частоту повторения частотной части лазера PEARL.

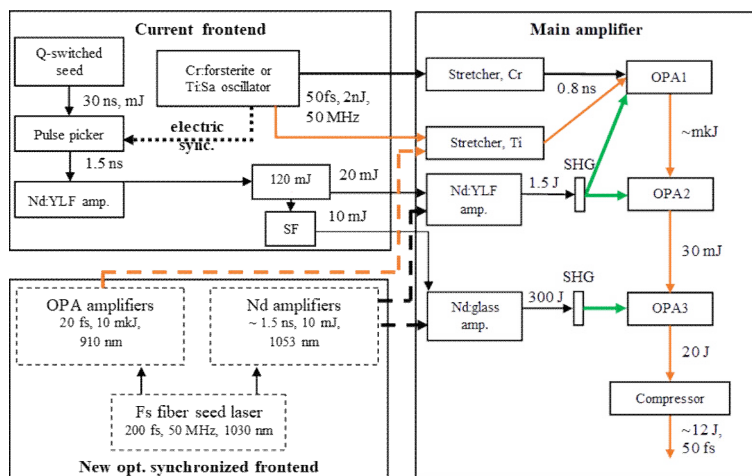


Рис. 28. Функциональная схема лазерного комплекса PEARL, SF – пространственный фильтр, OPA – оптический параметрический усилитель, SHG – блок генерации 2-й гармоники.

Для улучшения характеристик выходного излучения лазерного комплекса PEARL и повышения его функциональных возможностей на основе иттербиевого фемтосекундного лазера разработана новая стартовая система (рис. 28) [A31]. Ключевыми особенностями являются увеличенная до микроджоульного уровня энергия широкополосного импульса сигнала длительностью 20 фс, а также оптическая синхронизация между усиливаемым широкополосным сигналом и импульсами накачки параметрических усилителей. Большая энергия у импульсов широкополосного сигнала позволила уменьшить полный коэффициент усиления в каскадах OPA1 и OPA2 на 2 порядка, что более благоприятно для функции временного контраста импульса на выходе лазерного комплекса PEARL. Также в новой стартовой части формируются 2 импульса сигнала накачки, оптически синхронизованные с фс импульсом. Эти импульсы стретчируются и профилируются во времени, усиливаются до  $\sim 10$  мДж уровня и направляются непосредственно в усилители на основе Nd:YLF и Nd:glass.

Выполнена апробация новой стартовой системы в лазерном комплексе PEARL. Выходной спектр и автокорреляционная функция представлены на рис. 29. Длительность импульса составила 37 фс (по сравнению с 60 фс с использованием старой стартовой системы) и может быть дополнительно уменьшена после более прецизионной юстировки длительности импульсов накачки. Таким образом, новая стартовая система позволила повысить пиковую интенсивность лазера PEARL почти в 2 раза. Более наглядны результаты стабильности работы частотной части со старой и новой старто-

выми частями (рис. 30). За счет применения оптической синхронизации удалось повысить стабильность от импульса к импульсу с 40% до 3% СКО. Первые результаты использования новой стартовой системы в разовых выстрелах также демонстрируют значительный рост пиковой мощности и стабильности от импульса к импульсу.

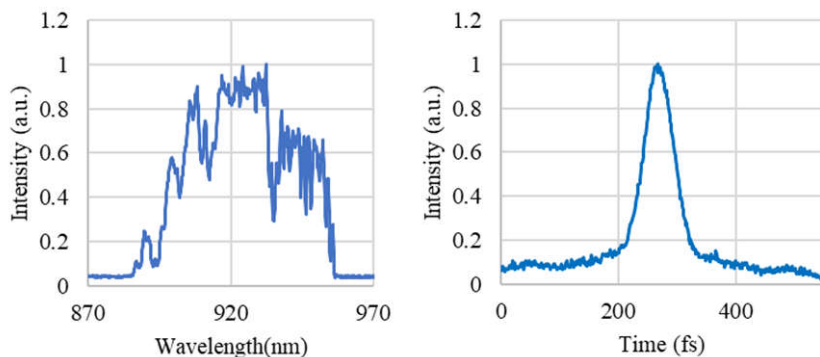


Рис. 29 Спектр усиленного в ОРА2 сигнала (слева) и его автокорреляционная функция после компрессии (слева) с новой стартовой системой.

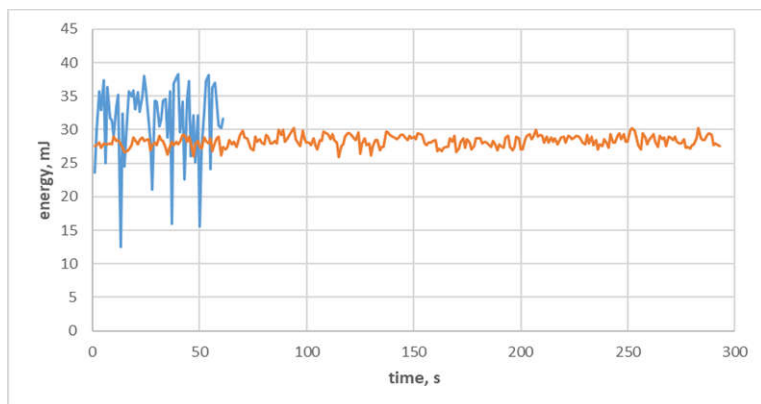


Рис. 30. Зависимость энергии в фс импульсе от времени на выходе частотной части комплекса PEARL с применением старой (синим) и новой (оранжевым) стартовой системы.

Параметрическое усиление фс импульсов методом ОРСРА является нелинейным процессом и сильно зависит от пространственно-временного распределения интенсивности накачки. Соответственно, гауссов профиль не импульса накачки не является оптимальным с точки зрения эффектив-

ности ОРСРА. Кроме того, насыщенное усиление в высокоэнергетических Nd:glass усилителях приводит к значительным искажениям профиля импульса [78]. Компенсировать такие искажения временной формы можно за счёт внесения предварительных искажений во временную огибающую импульса. С этой целью после дисперсионного устройства разработан формирователь спектрально-временного профилирования импульса на основе объемной чирпирующей брэгговской решетки (CVBG) и пространственного модулятора света (SLM) [A30]. Для демонстрации его работоспособности были сформированы лазерные импульсы с квазипрямоугольным распределением интенсивности во времени, а также с экспоненциальным ростом. При этом достигнуто спектральное разрешение порядка 0.16 нм, а временное 0.15 нс, что сопоставимо с лучшими результатами, получаемыми в системах профилирования временной формы на основе управления током диодного лазера. Этот подход также применен и для формирования профиля импульса накачки в новой стартовой системе PEARL. На рис. 31 представлены результаты предварительного профилирования импульса для Nd:glass лазера комплекса PEARL.

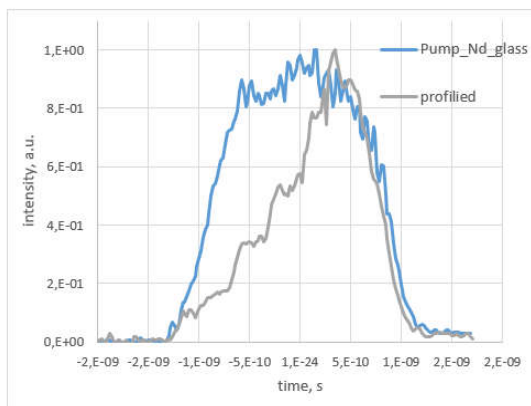


Рис.31. Осциллограммы импульса накачки на входе в узел Nd:glass preamp. при профилировании SLM равномерного распределения (синий) и линейно нарастающего (серый).

#### 4.4. Иттербиевые лазеры и фемтосекундные источники на их основе для создания мегасайенс установки XCELS

Описанные выше подходы применения иттербиевых лазеров для создания высокоинтенсивных фемтосекундных источников также актуальны для внедрения в крупномасштабные лазерные установки. В частности, с учетом имеющихся результатов разработана концепция стартовой части проекта

создания экзаваттного лазерного мегасайенс комплекса XCELS (eXawatt Center for Extream Light Study) [27, 28]. Дизайн нацелен на достижение высокой стабильности параметров излучения и возможности управления ими в широком диапазоне. В качестве источника излучения будет использован волоконный фемтосекундный иттербиевый лазер со стабилизацией частоты повторения импульсов (рис. 33). На выходе стартовой системы будут реализованы оптически синхронизованные чирпированные импульсы сигнала (длина волны 910 нм, полоса  $>100$  нм, длительность  $\sim 3$  нс) и накачки (длина волны 1054 нм, полоса  $\sim 1$  нм, длительность  $\sim 4$  нс) параметрических усилителей XCELS. Применение иттербиевых лазеров накачки позволит сформировать чирпированный фемтосекундный импульс с энергией более 100 мДж (длительность после компрессии не более 15 фс со стабилизацией фазы относительно огибающей) будет иметь частоту повторения импульсов до 100 Гц, что позволит реализовать активную стабилизацию энергии и минимизацию углового джиттера излучения на выходе XCELS. Применение пикосекундной накачки в параметрическом усилителе стартовой части обеспечит высокий контраст фемтосекундных импульсов. Импульс накачки будет обладать линейной частотной модуляцией, что не сказывается на эффективности параметрического усиления, но позволит спектральными методами управлять его формой для получения заданной формы импульса на выходе силовых усилителей даже в режиме их сильного насыщения.

Следует отметить, что комбинация волоконной и твердотельной составляющих лазерной системы позволяет гибко управлять основными параметрами выходных каналов излучения и добавлять дополнительные при необходимости. Использование подходов генерации суперконтинуума и пассивной стабилизации фазы поля относительно огибающей обеспечивает широкую перестройку параметров фс сигнала. Применение пс-каскадов параметрического усиления и генерации нелинейной поляризации обеспечивает высокий уровень контраста на мульти-мДж уровне энергии. Генерация излучения с относительно высокой средней мощностью в каналах стартовой системы позволит обеспечить стабилизацию основных параметров окончательных каскадов лазерной системы XCELS. Основные составляющие стартовой системы являются либо коммерчески доступными, либо реализованы в рамках научных исследований. Некоторые из предлагаемых узлов и подходов разработаны или проверяются экспериментально авторским коллективом данной работы.

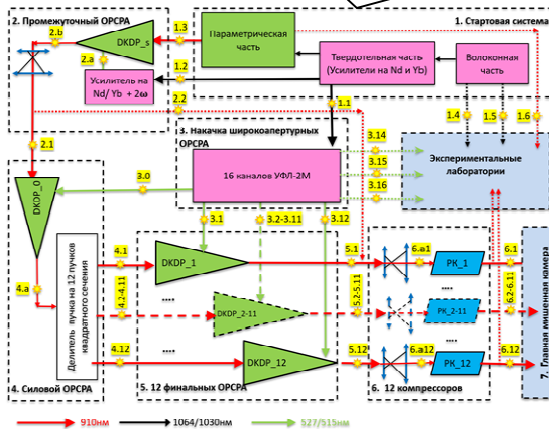
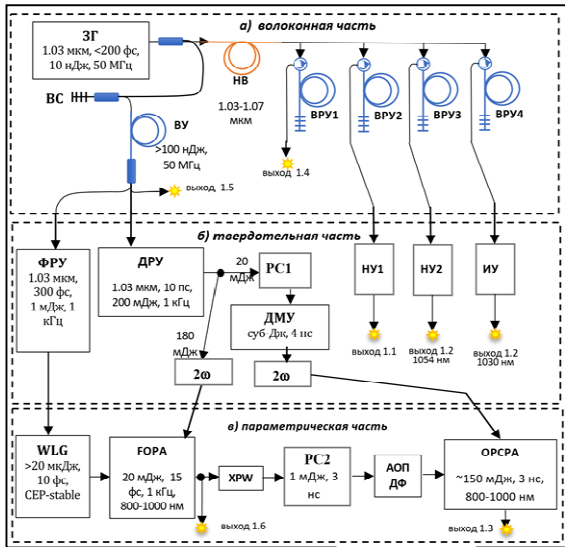


Рис. 33. Схема стартовой системы (сверху) и общая схема проекта XCELS (снизу). ЗГ – задающий генератор; НВ – нелинейное волокно; ВУ – волоконный усилитель; ВРУ – волоконные регенеративные усилители; ФРУ – фемтосекундный регенеративный усилитель; ДРУ – дисковый регенеративный усилитель; ДМУ – многопроходный иттербиевый усилитель; НИ – неодимовый усилитель; ИУ – иттербиевый усилитель; WLG – генератор сверхширокополосного фс излучения; FORA – узел параметрический усилитель; XPW – генератор ортогональной поляризации; ВС – волоконный стретчер; РС – стретчер на дифракционных решетках, АОПДФ – акустооптический программируемый дисперсионный фильтр.



## **Заключение.**

Основные результаты работы содержатся в следующем:

1. Разработаны методы диагностики лазерных (времени жизни и сечения усиления) и термооптических (теплопроводности, нелинейного тепловыделения) свойств иттербиевых активных сред.

2. Продемонстрирована высокоэффективная лазерная генерация с дифференциальным оптическим КПД более 35% в тонкодисковых активных элементах из Yb:YAG и Yb:(La)Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамики.

3. Показано, что изготовление тонкостержневых активных элементов из объемной заготовки без применения метода микровытягивания обеспечивает усиление лазерных импульсов более 11 раз за один проход в монокристаллической среде Yb:YAG при непрерывной накачке излучения, изготовлены и исследованы тонкостержневые активные элементы из поликристаллических (керамических) иттербиевых лазерных сред.

4. Исследовано усиление широкополосных импульсов в Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> керамике и продемонстрирована полоса усиления, соответствующая спектрально ограниченной длительности не более 500 фс при комнатной температуре активного элемента и не более 900 фс при криогенных температурах с охлаждением жидким азотом.

5. Разработана технология термодиффузионной сварки композитных дисковых активных элементов, в том числе из разнородных материалов Yb:YAG/Sa. Продемонстрировано высокое оптическое качество контакта и его механическая стойкость к тепловым нагрузкам.

6. Экспериментально и теоретически показано, что композитная геометрия дискового активного элемента с его монтажом на профилированный радиатор позволяет увеличивать плотность запасенной энергии и уменьшать термонаведенные фазовые искажения при непрерывной накачке.

7. Применение криогенного охлаждения в иттербиевом дисковом лазере позволило значительно поднять частоту повторения лазерных импульсов с сохранением высокой энергии в импульсе. При использовании кристаллических дисковых активных элементов Yb:YAG достигнуто 150 мДж и суб-кГц частота повторения наносекундных импульсов, а при использовании аналогичных керамических – до 240 мДж при 200 Гц частоте повторения.

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

9. 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.

10. Оптимизирован способ управления спектрально-временным профилем chirпированного лазерного импульса за счет применения объемной chirпирующей брэгговской решетки. Продемонстрировано временное профилирование импульса со спектральным разрешением не хуже 0.16 нм и временным разрешением не хуже 0.15 нс.

11. Разработана 30-ти фемтосекундная система 2 мкм спектрального диапазона с энергией в импульсе 25 мкДж. Для дальнейшего усиления импульсов разработана и реализована дисперсионная система с параметрическим усилением в фурье-плоскости, а также оптически синхронизованный иттербиевый лазер накачки 100 мДж уровня энергии.

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

## Список литературы:

1. *D. C. Brown* Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 1997. - Vol.33. - №5. - P.861-873.
2. *T. Taira, W. M. Tulloch, R. L. Byer* Modeling of quasi-tree level lasers and operation of cw Yb:YAG lasers // *Applied Optics*. - 1997. - Vol.36. - №9. - P.1867-1874.
3. *S. Banerjee, K. Ertel, P. D. Mason, P. J. Phillips, M. Siebold, M. Loeser, C. Hernandez-Gomez, J. L. Collier* High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier // *Optical Letters*. - 2012. - Vol.vol. 37. - P.2175-2177.
4. *C. R. E. Baer, C. Kränkel, C. J. Saraceno, O. H. Heckl, M. Golling, R. Peters, K. Petermann, T. Südmeyer, G. Huber, U. Keller* Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power // *Optics Letters*. - 2010. - Vol.35. - №13. - P.2302–2304
5. *J. Aus der Au, G. J. Spuhler, T. Sudmeyer, R. Paschotta, R. Hovel, M. Moser, S. Erhard, M. Karszewski, A. Giesen, U. Keller* 16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond Yb:YAG thin disk laser // *Optics Letters*. - 2000. - Vol.25. - №11. - P.859-861.
6. *M. Larionov, K. Schuhmann, J. Speiser, C. Stolzenburg, A. Giesen* Nonlinear Decay of the Excited State in Yb:YAG // in *Advanced Solid-State Photonics*, - 2005. - p. TuB49.
7. *P. Mason, A. Lintern, S. Tomlinson, K. Ertel, S. Banerjee, J. Phillips, J. Greenhalgh, J. Collier*, "Design of a Multi-Pass Extraction Architecture for the DiPOLE Prototype Amplifier," presented at the 7th HEC-DPSSL Workshop, 12-14th September 2012, Lake Tahoe, California, 2012.
8. *H. Okada, K. Sumimura, H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatuska* Ceramic Nd:YAG split-disk laser amplifier with a 10 J output energy // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, - 2005. - JTuC25.
9. *X. Délen, Y. Zaouter, I. Martial, N. Aubry, J. Didierjean, C. Hönninger, E. Mottay, F. Balembos, P. Georges* Yb:YAG single crystal fiber power amplifier for femtosecond sources // *Optics Letters*. - 2013. - Vol.38. - №2. - P.109-111.
10. *I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. V. Palashov* Yb : YAG thin-rod laser amplifier with a high pulse energy for a fibre oscillator // *Quantum Electronics*. - 2016. - Vol.46. - №4. - P.375-378.
11. *I. B. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov, A. G. Vyatkin, E. A. Perevezentsev* Laser and thermal characteristics of Yb : YAG crystals in the 80 — 300 K temperature range // *Quantum Electronics*. - 2011. - Vol.41. - №11. - P.1045.

12. Characterization of Bivoj/DiPOLE 100: HiLASE 100-J/10-Hz diode pumped solid state laser / J. Pilar, M. De Vido, M. Divoky, P. Mason, M. Hanus, K. Ertel, P. Navratil, T. Butcher, O. Slezak, S. Banerjee, J. Phillips, J. Smith, A. Lucianetti, C. Hernandez-Gomez, C. Edwards, J. Collier, T. Mocek -: SPIE, 2018.

13. *L. E. Zapata, S. Schweisthal, J. Thesinga, C. Zapata, M. Schust, F. X. Kaertner* One Joule 500 Hz cryogenic Yb:YAG Laser Driver // Laser Congress 2018 (ASSL), OSA Technical Digest. - 2018. - ATu6A.1.

14. *V. Ginzburg, I. Yakovlev, A. Kochetkov, A. Kuzmin, S. Mironov, I. Shaikin, A. Shaykin, E. Khazanov* 11 fs, 1.5 PW laser with nonlinear pulse compression // Optics Express. - 2021. - Vol.29. - №18. - P.28297-28306.

15. *B. Dannecker, J.-P. Negel, A. Loescher, P. Oldorf, S. Reichel, R. Peters, T. Graf, M. Abdou Ahmed* Exploiting nonlinear spectral broadening in a 400 W Yb:YAG thin-disk multipass amplifier to achieve 2 mJ pulses with sub-150 fs duration // Optics Communications. - 2018. - Vol.429. - P.180-188.

16. *N. Garejev, G. Tamošauskas, A. Dubietis* Multioctave supercontinuum generation in bulk solid-state dielectrics in the range of near zero to anomalous group velocity dispersion // 2017 European Conference on Lasers and Electro-Optics and European Quantum Electronics Conference, - 2017. - CF\_P\_21.

17. *R. Antipenkov, A. Varanavičius, A. Zaukevičius, A. P. Piskarskas* Femtosecond Yb:KGW MOPA driven broadband NOPA as a frontend for TW few-cycle pulse systems // Optics Express. - 2011. - Vol.19. - №4. - P.3519-3524.

18. *T. S. S Toth, I Balciunas, R Budriunas, J Adamonis, R Danilevicius, K Viskontas, D Lengvinas, G Veitas, D Gadonas, A Varanavičius, J Csontos, T Somoskoi, L Toth, A Borzsonyi and K Osvay* SYLOS lasers – the frontier of few-cycle, multi-TW, kHz lasers for ultrafast applications at extreme light infrastructure attosecond light pulse source // JPhys Photonics. - 2020. - Vol.2. - P.045003.

19. *T. Feng, A. Heilmann, M. Bock, L. Ehrentraut, T. Witting, H. Yu, H. Stiel, S. Eisebitt, M. Schnürer* 27 W 2.1  $\mu\text{m}$  OPCPA system for coherent soft X-ray generation operating at 10 kHz // Optics Express. - 2020. - Vol.28. - №6. - P.8724-8733.

20. *I. Kuznetsov, I. Mukhin, D. Silin, O. Palashov* Thermal conductivity measurements using phase-shifting interferometry // Optical Materials Express. - 2014. - Vol.4. - №10. - P.2204-2208.

21. *M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin* A New Method of Diagnostics of the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media // IEEE Journal of Quantum Electronics. - 2018. - Vol.54. - №1. - P.1-6.

22. *J. Kajan, M. Volkov, G. Damazyan, I. Mukhin, T. Gregor, O. Palashov* Fabrication and Characterization of High-Dimension Single-Crystal Yb:YAG Ingots Grown by Horizontal Directed Crystallization Method // Crystal Research and Technology - Vol.n/a. - №n/a. - P.2000105.

23. *I. M. Mikhail Volkov, Ivan Kuznetsov, Grigory Kurnikov* Suppression of thermally induced lens in composite disk active elements by shaping a heat-removing plate // *Optics Continuum*. - 2023. - Vol.2. - №2.

24. *I. B. Mukhin, A. A. Soloviev, E. A. Perevezentsev, A. A. Shaykin, V. N. Ginzburg, I. V. Kuzmin, M. A. Mart'yanov, I. A. Shaikin, A. A. Kuzmin, S. Y. Mironov, I. V. Yakovlev, E. A. Khazanov* Design of the front-end system for a subexawatt laser of the XCELS facility // *Quantum Electronics*. - 2021. - Vol.51. - №9. - P.759-767.

25. *И. Б. Мухин, И. И. Кузнецов, О. В. Палашов* Генерация фемтосекундных импульсов в несколько осцилляций поля из излучения пикосекундного лазера накачки с последующим усилением // *Квантовая электроника*. - 2018. - Vol.48. - №4. - P.340-343.

26. *И. Б. Мухин, М. Р. Волков, И. А. Викулов, Е. А. Перевезенцев, О. В. Палашов* Иттербиевая лазерная система для исследований параметрического усиления фемтосекундных импульсов с центральной длиной волны ~2 мкм // *Квантовая электроника*. - 2020. - Vol.50. - №4. - P.321-326.

27. *И. Б. Мухин, А. А. Соловьев, Е. А. Перевезенцев, А. А. Шайкин, В. Н. Гинзбург, И. В. Кузьмин, М. А. Мартьянов, И. А. Шайкин, К. А.А., С. Ю. Миронов, И. В. Яковлев, Е. А. Хазанов* Дизайн стартовой части субэкзаваттного лазера проекта XCELS // *Квантовая электроника*. - 2021. - Vol.51. - №9. - P.759-767.

28. *А. А. Ш. Е.А.Хазанов, И.Ю.Костюков, В.Н.Гинзбург, И.Б.Мухин, И.В.Яковлев, И. И. К. А.А.Соловьев, С.Ю.Миронов, А.В.Коржиманов, Д.Н.Буланов, А. А. К. И.А.Шайкин, А.А.Кузьмин, М.А.Мартьянов, В.В.Ложкарев, А. Г. Л. М.В.Стародубцев, А.М.Сергеев* XCELS - Международный центр исследований экстремальных световых полей // *Квантовая электроника*. - 2023. - Vol.принято к публикации.

29. *M. Larionov, K. Schuhmann, J. Speiser, C. Stolzenburg, A. Giesen* Nonlinear Decay of the Excited State in Yb:YAG // *Advanced Solid-State Photonics, Technical Digest*. - 2005. - TuB49.

30. *J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, F. Gan* Dependence of the Yb<sup>3+</sup> 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.

31. *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.

32. *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.

33. *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.

34. S. F. Corbin, D. M. Turriff, "Thermal Diffusivity by The Laser Flash Technique," in *Characterization of Materials*, ed, pp. 1-10.

35. M. Hass, H. B. Rosenstock Lattice Infrared Absorption and Raman Scattering in Finite Crystals // *Applied Optics*. - 1967. - Vol.6. - №12. - P.2079-2084.

36. O. Casagrande, N. Deguil-Robin, B. L. Garrec, G. L. Bourdet Time and Spectrum Resolved Model for Quasi-Three-Level Gain-Switched Lasers // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. - 2007. - Vol.43. - №2. - P.206-212.

37. H. Kühn, S. T. Fredrich-Thornton, C. Kränkel, R. Peters, K. Petermann Model for the calculation of radiation trapping and description of the pinhole method // *Optics Letters*. - 2007. - Vol.32. - №13. - P.1908-1910.

38. H. Kühn, K. Petermann, G. Huber Correction of reabsorption artifacts in fluorescence spectra by the pinhole method // *Optics Letters*. - 2010. - Vol.35. - №10. - P.1524-1526.

39. A. Ikesue, T. Kinoshita, K. Kamata, K. Yoshida Fabrication and optical properties of high -performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers // *Journal of the American Ceramic Society*. - 1995. - Vol.78. - №4. - P.1033-1040.

40. И. Л. Снетков, О. В. Палашов, В. В. Осипов, И. Б. Мухин, Р. Н. Максимов, В. А. Шитов, К. Е. Лукьяшин Исследование генерационных характеристик отечественной лазерной Yb : YAG-керамики // *Квант. электроника*. - 2016. - Vol.46. - №7. - P.586-588.

41. M. Tokurakawa, A. Shirakawa, K.-i. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, A. A. Kaminskii Diode-pumped sub-100 fs Kerr-lens mode-locked Yb<sup>3+</sup>:Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser // *Optics Letters*. - 2007. - Vol.32. - №23. - P.3382-3384.

42. V. V. Zelenogorsky, E. A. Perevezentsev, I. V. Mukhin, O. V. Palashov, E. A. Khazanov, H. Yagi, T. Yanagitani, H. Yoneda, A. Shirakawa, K. Ueda, A. A. Kaminskii, "Lasing and spectroscopic properties of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics doped with YB<sup>3+</sup> ions," presented at the 8th Laser Ceramics Symposium: International Symposium on Transparent Ceramics for Photonic Applications, Russia, Nizhny Novgorod, December 4-7, 2012., Russia, Nizhny Novgorod, 2012.

43. F. Lesparre, J. T. Gomes, X. Délen, I. Martial, J. Didierjean, W. Pallmann, B. Resan, F. Druon, F. Balembois, P. Georges Yb:YAG single-crystal fiber amplifiers for picosecond lasers using the divided pulse amplification technique // *Optics Letters*. - 2016. - Vol.41. - №7. - P.1628-1631.

44. V. Markovic, A. Rohrbacher, P. Hofmann, W. Pallmann, S. Pierrot, B. Resan 160 W 800 fs Yb:YAG single crystal fiber amplifier without CPA // *Optics Express*. - 2015. - Vol.23. - №20. - P.25883-25888.

45. X. Délen, S. Piehler, J. Didierjean, N. Aubry, A. Voss, M. A. Ahmed, T. Graf, F. Balembois, P. Georges 250 W single-crystal fiber Yb:YAG laser // Optics Letters. - 2012. - Vol.37. - №14. - P.2898-2900.
46. J. Speiser Thin Disk Laser – Energy Scaling”, // Laser Physics. - 2009. - Vol.9. - №2. - P.274-280.
47. D. Kouznetsov, J.-F. Bisson Role of undoped cap in the scaling of thin-disk lasers // JOSA B. - 2008. - Vol.25. - №3. - P.338-345.
48. J. Neuhaus, J. Kleinbauer, A. Killi, S. Weiler, D. Sutter, T. Dekorsy Passively mode-locked Yb:YAG thin-disk laser with pulse energies exceeding 13 μJ by use of an active multipass geometry // Optics Letters. - 2008. - Vol.33. - №7. - P.726-728.
49. I. B. Mukhin, M. R. Volkov, I. A. Vikulov, E. A. Perevezentsev, O. V. Palashov Ytterbium laser system for studying parametric amplification of femtosecond pulses with a centre wavelength of ~2 μm // Quantum Electronics. - 2020. - Vol.50. - №4. - P.321-326.
50. D. C. Brown The promise of cryogenic solid-state lasers // IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics. - 2005. - Vol.11. - №3. - P.587-599.
51. 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 80-300K // Квантовая Электроника. - 2011. - Vol.41. - P.1045.
52. O. L. Vadimova, I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, E. A. Perevezentsev, O. V. Palashov Comparison of composite and disk shaped active elements for pulsed lasers // Laser Phys. - 2015. - Vol.25. - P.095001
53. О. Л. Вадимова, И. Б. Мухин, И. И. Кузнецов, О. В. Палашов, Е. А. Перевезенцев, Е. А. Хазанов Расчет коэффициента усиления в криогенно охлаждаемых Yb:YAG-дисках в условии сильного тепловыделения // Квантовая электроника. - 2013. - Vol.43. - №3. - P.201-206.
54. 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. - Vol.43. - №3. - P.207-210.
55. 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. - Vol.44. - №5. - P.448-451.
56. E. Perevezentsev, I. Mukhin, O. Palashov, I. Kuznetsov, O. Vadimova, "High power cryogenic Yb:YAG disk laser with nanosecond output pulse duration," presented at the Abs. 16th Int. Conf. Laser Optics 2014,ThR2-13, 2014.
57. М. Р. Волков, И. Б. Мухин Применение жидкостного низкотемпературного охлаждения в многодисковом иттербиевом лазерном квантроне в условиях мультиджоулевой накачки при высокой частоте

следования импульсов // Квантовая электроника. - 2021. - Vol.51. - №10. - P.878-885.

58. *M. Divoky, J. Pilar, M. Hanus, P. Navratil, M. Sawicka-Chyla, M. De Vido, P. J. Phillips, K. Ertel, T. Butcher, M. Fibrich, J. T. Green, M. Koselja, J. Prelikova, J. Kubat, J. Houzvicka, B. Rus, J. Collier, A. Lucianetti, T. Mocek* Performance comparison of Yb:YAG ceramics and crystal gain material in a large-area, high-energy, high average power diode-pumped laser // *Optics Express*. - 2020. - Vol.28. - №3. - P.3636-3646.

59. *D. Luo, J. Zhang, C. Xu, X. Qin, D. Tang, J. Ma* Fabrication and Laser Properties of Transparent Yb:YAG Ceramics // *Optical Materials* -2012. - Vol.34. - №6. - P.936-939.

60. *R. Budriūnas, T. Stanislauskas, J. Adamonis, A. Aleknavičius, G. Veitas, D. Gadonas, S. Balickas, A. Michailovas, A. Varanavičius* 53 W average power CEP-stabilized OPCPA system delivering 5.5 TW few cycle pulses at 1 kHz repetition rate // *Optics Express*. - 2017. - Vol.25. - №5. - P.5797-5806.

61. *H. Fattahi, H. Wang, A. Alismail, G. Arisholm, V. Pervak, A. M. Azzeer, F. Krausz* Near-PHz-bandwidth, phase-stable continua generated from a Yb:YAG thin-disk amplifier // *Optics Express*. - 2016. - Vol.24. - №21. - P.24337-24346.

62. *T. F. Andrius Baltuška, and Takayoshi Kobayashi* Controlling the Carrier-Envelope Phase of Ultrashort Light Pulses with Optical Parametric Amplifiers // *Phys. Rev. Lett.* - 2002. - Vol.88. - P.133901.

63. *V. Ginzburg, I. Yakovlev, A. Kochetkov, A. Kuzmin, S. Mironov, I. Shaikin, A. Shaykin, E. Khazanov* 11 fs, 1.5 PW Laser with Nonlinear Pulse Compression // *Laser Congress 2021 (ASSL,LAC)*, - 2021. - AW2A.4.

64. *A. Shaykin, V. Ginzburg, I. Yakovlev, A. Kochetkov, A. Kuzmin, S. Mironov, I. Shaikin, S. Stukachev, V. Lozhkarev, A. Prokhorov, E. Khazanov* Use of KDP crystal as a Kerr nonlinear medium for compressing PW laser pulses down to 10 fs // *High Power Laser Science and Engineering*. - 2021. - Vol.9. - P.e54.

65. *T. Harimoto, K. Yamakawa* Self compression of Yb-doped solid-state lasers by combination of self-phase modulation and group-velocity dispersion in KDP crystal // *Optics Express*. - 2007. - Vol.15. - №23. - P.15438-15443.

66. *T. Gaumnitz, A. Jain, Y. Pertot, M. Huppert, I. Jordan, F. Ardana-Lamas, H. J. Wörner* Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver // *Optics Express*. - 2017. - Vol.25. - №22. - P.27506-27518.

67. *D. Woodbury, L. Feder, V. Shumakova, C. Gollner, R. Schwartz, B. Miao, F. Salehi, A. Korolov, A. Pugžlys, A. Baltuška, H. M. Milchberg* Laser wakefield acceleration with mid-IR laser pulses // *Optics Letters*. - 2018. - Vol.43. - №5. - P.1131-1134.

68. *M. Clerici, M. Peccianti, B. E. Schmidt, L. Caspani, M. Shalaby, M. Giguère, A. Lotti, A. Couairon, F. Légaré, T. Ozaki, D. Faccio, R. Morandotti*



Wavelength Scaling of Terahertz Generation by Gas Ionization // *Physical Review Letters*. - 2013. - Vol.110. - №25. - P.253901.

69. *V. Gruson, G. Ernotte, P. Lassonde, A. Laramée, M. R. Bionta, M. Chaker, L. Di Mauro, P. B. Corkum, H. Ibrahim, B. E. Schmidt, F. Legaré* 2.5 TW, two-cycle IR laser pulses via frequency domain optical parametric amplification // *Optics Express*. - 2017. - Vol.25. - №22. - P.27706-27714.

70. *C. Baumgarten, M. Pedicone, H. Bravo, H. Wang, L. Yin, C. S. Menoni, J. J. Rocca, B. A. Reagan* 1 J, 0.5 kHz repetition rate picosecond laser // *Optics Letters*. - 2016. - Vol.41. - №14. - P.3339-3342.

71. *B. E. Schmidt, N. Thiré, M. Boivin, A. Laramée, F. Poitras, G. Lebrun, T. Ozaki, H. Ibrahim, F. Légaré* Frequency domain optical parametric amplification // *Nature Communications*. - 2014. - Vol.5. - №1. - P.3643.

72. *V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. N. Ginzburg, E. V. Katin, E. A. Khazanov, A. V. Kirsanov, G. A. Luchinin, A. N. Mal'shakov, M. A. Martyanov, O. V. Palashov, A. K. Poteomkin, A. M. Sergeev, A. A. Shaykin, I. V. Yakovlev* Compact 0.56 petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD\*P crystals // *Laser Physics Letters*. - 2007. - Vol.4. - №6. - P.421-427.

73. *A. Soloviev, K. Burdonov, S. N. Chen, A. Ereemeev, A. Korzhimanov, G. V. Pokrovskiy, T. A. Pikuz, G. Revet, A. Sladkov, V. Ginzburg, E. Khazanov, A. Kuzmin, R. Osmanov, I. Shaikin, A. Shaykin, I. Yakovlev, S. Pikuz, M. Starodubtsev, J. Fuchs* Experimental evidence for short-pulse laser heating of solid-density target to high bulk temperatures // *Scientific Reports*. - 2017. - Vol.7. - №1. - P.12144.

74. *A. A. Soloviev, K. F. Burdonov, V. N. Ginzburg, A. A. Gonoskov, E. V. Katin, A. V. Kim, A. V. Kirsanov, A. V. Korzhimanov, I. Y. Kostyukov, V. V. Lozhkarev, G. A. Luchinin, A. N. Mal'shakov, M. A. Martyanov, E. N. Nerush, O. V. Palashov, A. K. Poteomkin, A. M. Sergeev, A. A. Shaykin, M. V. Starodubtsev, I. V. Yakovlev, V. V. Zelenogorsky, E. A. Khazanov* Fast electron generation using PW-class PEARL facility // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. - 2011. - Vol.653. - №1. - P.35-41.

75. *B. Khair, G. Revet, A. Ciardi, K. Burdonov, E. Filippov, J. Béard, M. Cerchez, S. N. Chen, T. Gangolf, S. S. Makarov, M. Ouillé, M. Safronova, I. Y. Skobelev, A. Soloviev, M. Starodubtsev, O. Willi, S. Pikuz, J. Fuchs* Laser-Produced Magnetic-Rayleigh-Taylor Unstable Plasma Slabs in a 20 T Magnetic Field // *Phys Rev Lett*. - 2019. - Vol.123. - №20. - P.205001.

76. *G. I. Freidman, I. V. Yakovlev* New stretcher scheme for a parametric amplifier of chirped pulses with frequency conversion // *Quantum Electronics*. - 2007. - Vol.37. - №2. - P.147-148.

77. *V. N. G. A. S. Zuev, A. A. Kochetkov, A. A. Shaykin, I. V. Yakovlev* Offner stretcher for the PEARL laser facility // *Quantum Electronics*. - 2017. - Vol.47. - №8. - P.705-710.

78. М. А. Мартыянов, Г. А. Лучинин, А. К. Потемкин, Е. А. Хазанов  
Линейная зависимость временного сдвига усиленного импульса от  
энергосъема с лазерного усилителя // Квантовая Электроника. - 2008. -  
Vol.38. - №2. - P.103-108.

**Список литературы кватрилей Q1 и Q2, в которой изложены материа-  
лы диссертации:**

A1. Volkov M. R., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., A New Method of Diagnostics of  
the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media // IEEE Journal of Quantum Elec-  
tronics. 2018. V.54, №1. P.1-6.

A2. Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Yb : YAG thin-rod laser ampli-  
fier with a high pulse energy for a fibre oscillator // Quantum Electronics. 2016.  
Vol.4, №4. P.375-378.

A3. Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Silin D. E., Palashov O. V., Thermal conduc-  
tivity measurements using phase-shifting interferometry // Optical Materials Ex-  
press. 2014. V.4, №10. P.2204-2208.

A4. M. Ivanov, Y. Kopylov, V. Kravchenko, J. Li, Y. Pan, U. Kynast, M. Leznina,  
W. Strek, L. Marciniak, O. Palashov, I. Snetkov, I. Mukhin, D. Spassky Optical,  
luminescent and laser properties of highly transparent ytterbium doped yttrium  
lanthanum oxide ceramics // Optical Materials. 2015. V.50, Part A. P.15-20.

A5. Snetkov I. L., Mukhin I. B., Balabanov S. S., Permin D. A., Palashov O. V.,  
Efficient lasing in Yb:(YLa)2O3 ceramics // Quantum Electronics. 2015. V.45,  
№2. P.95-97.

A6. Snetkov I. L., Palashov O. V., Osipov V. V., Mukhin I. B., Maksimov R. N.,  
Shitov V. A., Luk'yashin K. E., Investigation of lasing characteristics of domestic  
Yb : YAG laser ceramics // Quantum Electronics. 2016. V.46, №7. P.586-588.

A7. Snetkov I. L., Mukhin I. B., Palashov O. V., Comparative characteristics of  
Yb:(YLa)2O3 laser ceramics // Quantum Electronics. 2016. V.46, №3. P. 193–  
196.

A8. Balabanov S. S., Belyaev A. V., Gavrishchuk E. M., Mukhin I. B., Novikova A.  
V., Palashov O. V., Permin D. A., Snetkov I. L., Fabrication and measurement of  
optical and spectral properties of the transparent Yb:MgAl2O4 ceramics // Opti-  
cal Materials. 2017. V.71, №Supplement C. P.17-22.

- A9. *Snetkov I. L., Palashov O. V., Osipov V. V., Mukhin I. B., Maksimov R. N., Shitov V. A., Luk'yashin K. E.*, Continuous-wave 80-W lasing in Yb : YAG ceramics // *Quantum Electronics*. 2018. V.48, №8. P.683-685.
- A10. *Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Vadimova O. L., Palashov O. V., Ken-Ichi Ueda*, Thermal effects in Yb:YAG single-crystal thin-rod amplifier // *Applied Optics*. 2015. V.54, №25. P.7747.
- A11. *I. I. Kuznetsov, I. B. Mukhin, O. V. Palashov, K.-I. Ueda*, Thin-tapered-rod Yb:YAG laser amplifier // *Optics Letters*. 2016. V.41. 5361-5364.
- A12. *Volkov M. R., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Konyashchenko A. V., Tenyakov S. Y., Liventsov R. A.*, Thin-rod active elements for amplification of femtosecond pulses // *Quantum Electronics*. 2019. V.49, №4. P.350-353.
- A13. *B. Lee, Chizhov S. A., Sall E. G., Kim J. W., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Kim G. H., Yashin V. E., Vadimova O. L.*, Laser amplification in Yb:YAG thin rods of different geometries: simulation and experiment // *Journal of the Optical Society of America B*. 2018. V.35. №10. P.2594-2599
- A14. *Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Ueda K.-I.*, Thin-rod Yb:YAG amplifiers for high average and peak power lasers // *Optics Letters*. 2018. V.43, №16. P.3941-3944.
- A15. *Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Silin D. E., Vyatkin A. G., Vadimova O. L., Palashov O. V.*, Thermal effects in end-pumped Yb:YAG thin-disk and Yb:YAG/YAG composite active element // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2014. V.50, №3. P.133-140.
- A16. *Volkov M. R., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V.*, Disk laser heads based on Yb : YAG for multikilowatt average power lasers // *Quantum Electronics*. 2019. V.49, №4. P.354-357.
- A17. *Volkov M. R., Mukhin I. B., Kuznetsov I. I., Palashov O. V.*, Thin-disk laser with multipass unstable ring resonator // *Journal of the Optical Society of America B*. 2019. Vol.36, №5. P.1370-1375.
- A18. *Perevezentsev E. A., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V.*, Matrix multi-pass scheme disk amplifier // *Applied Optics*. 2017. V.56. - №30. P.8471-8476.

- A19. *Mukhin I. B., Perevezentsev E. A., Palashov O. V.*, Fabrication of composite laser elements by a new thermal diffusion bonding method // *Optical Materials Express*. 2014. V.4, №2. P.266-271.
- A20. *Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Vadimova O. L., Palashov O. V.*, Thin-disk laser based on an Yb:YAG / YAG composite active element // *Quantum Electronics*. 2015. V.45, №3. P.207-210.
- A21. *Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V.*, Improvement of thermal management in composite Yb:YAG/YAG thin-disk laser // *Laser Physics*. 2016. V.26, №4. - P.045004.
- A22. *Kuznetsov I. I., Volkov M. R., Mukhin I. B.*, Composite Yb:YAG/sapphire thin-disk active elements produced by thermal diffusion bonding // *Journal of the Optical Society of America B*. 2020. V.37, №7. P.2193-2198.
- A23. *Vadimova O. L., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Perevezentsev E. A., Palashov O. V.*, Comparison of composite and disk shaped active elements for pulsed lasers // *Laser Phys*. 2015. V.25. P.095001.
- A24. *Perevezentsev E. A., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Volkov M. R., Palashov O. V.*, Multipass cryogenic Yb:Y2O3 ceramic disk amplifier // *Applied Physics B*. 2019. V.125. P.141.
- A25. *Perevezentsev E. A., Mukhin I. B., Vadimova O. L., Palashov O. V., Khazanov E. A., Dewei Luo, Jian Zhang, Tang D.*, Yb:YAG ceramics application for high energy cryogenic disk amplifier development // *Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science*. 2013. - V.210, №6. P.1232-1234.
- A26. *Perevezentsev E. A., Mukhin I. B., Kuznetsov I. I., Vadimova O. L., Palashov O. V.*, Nanosecond cryogenic Yb:YAG disk laser // *Quantum Electronics*. 2014. V.44, №5. P.448-451.
- A27. *Perevezentsev E. A., Mukhin I. B., Kuznetsov I. I., Vadimova O. L., Palashov O. V.*, Front-end system for Yb : YAG cryogenic disk laser // *Quantum Electronics*. 2015. V.45, №5. P.451-454.
- A28. *Mironov S. Y., Mukhin I. B., Lozhkarev V. V., Potemkin A. K., Martyanov M. A., Kuzmin I. V., Khazanov E. A.*, Temporal compression of high-power IR laser pulses in a KDP crystal // *Applied Optics*. 2022. V.61, №20. P.6033-6037.

A29. *Mukhin I. B., Kuznetsov I. I., Palashov O. V.*, Generation and subsequent amplification of fewcycle femtosecond pulses from a picosecond pump laser // Quantum Electronics. 2018. V.48, №4. P.340-343.

A30. *Martyanov M. A., Mukhin I. B., Kuzmin I. V., Mironov S. Y.*, Compact pulse shaper based on a tilted volume Bragg grating // Optics Letters. 2022. V.47, №3. P.557-560.

A31. *I. B. Mukhin, K. A. Glushkov, A. A. Soloviev, A. A. Shaykin, V. N. Ginzburg, I. V. Kuzmin, M. A. Martyanov, S. E. Stukachev, S. Y. Mironov, I. V. Yakovlev, E. A. Khazanov*, Upgrading the front end of the petawatt-class PEARL laser facility // Applied Optics. - 2023. - Vol.62. - №10. - P.2554-2559.





Подписано к печати 16.06.2023. Формат 60x90 1/16  
Бумага офсетная №1. Тираж 150 экз. Заказ №36

---

Отпечатано в типографии ИП Сеницын А.Е.  
603155 г. Нижний Новгород, ул. Провиантская, 8