

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
лазерной физики Сибирского отделения  
Российской академии наук

чл.-к. РАН  А.В.Тайченачев

«18» сентября 2020 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт лазерной физики Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИЛФ СО РАН)**

на диссертационную работу ВОЛКОВА Михаила Романовича  
«Подавление тепловых эффектов в иттербиевых дисковых лазерах  
киловаттного уровня средней мощности»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.21 – Лазерная физика

Диссертационная работа М.Р.Волкова посвящена решению актуальной задачи – подавлению тепловых эффектов в иттербиевых дисковых лазерах киловаттного уровня мощности, которые имеют широкое применение в многочисленных прикладных задачах, включая оптическую томографию в медицине, интроскопию в сфере безопасности, прецизионную резку и обработку материалов в промышленности. В работе подробно представлены результаты комплексных исследований источников тепловыделения и структуры тепловых потоков дисковых активных элементов, их генерационные характеристики, а также обосновано применение таких элементов для генерации и усиления излучения киловаттного уровня мощности. В частности, выполнены подробные исследования базовых параметров легированных иттербием лазерных сред, таких как сечение усиления, время жизни, потери на поглощение, подробно обсужден эффект дополнительного тепловыделения. Проведена разработка оптимальных способов накачки и охлаждения дисковых

активных элементов и путей подавления возникающих термонаведенных искажений излучения. Представленные в диссертационной работе результаты и методики имеют важное значение для создания высокоэффективных дисковых иттербиевых лазеров с высокой средней и пиковой мощностью.

### **Актуальность**

В настоящее время источники когерентного излучения, а также оптические приборы и системы на их основе используются практически во всех областях человеческой деятельности, включая научные исследования, промышленное производство, телекоммуникацию и связь, метрологию, навигацию, медицину, ряд военных применений. В этой связи разработка новых принципов и подходов для реализации лазерных излучателей с высокой средней мощностью, с большой энергией и частотой повторения импульсов и хорошим оптическим качеством пучка является актуальной научно-технической задачей, имеющей большой прикладной потенциал. Дисковые активные элементы на основе лазерных кристаллов и керамик позволяют существенно улучшить характеристики генерации и выйти на рекордные параметры по средней мощности и энергетике пучка при заданных массогабаритных характеристиках излучателя. Важное значение имеют исследования новых материалов для дисковых лазеров, в том числе разупорядоченных сред и композитных структур, обладающих улучшенными спектральными и/или тепловыми характеристиками.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы Волкова М.Р. обусловлена как комплексным подходом к исследованию дисковых активных элементов лазерных излучателей киловаттного класса, так и рядом практических результатов, представляющих значительный интерес для разработки эффективных лазерных источников с высокой мощностью.

### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация Волкова М.Р. состоит из введения, трех глав, заключения, двух приложений, и списка цитируемой литературы, включающего и работы

автора. Общий объем диссертации составляет 117 страниц, включая 45 рисунков и 5 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 87 источников.

Во **Введении** кратко представлены основные области использования мощных твердотельных лазеров, обсуждены проблемы получения лазерного излучения большой мощности, в том числе связанные со значительным тепловыделением в активном элементе. Одним из возможных технических решений, уменьшающих термооптические искажения при высоких уровнях накачки, является использование активных элементов дисковой формы, диаметр которых существенно превышает толщину активного слоя. Обсуждены основные преимущества и недостатки дисковых активных элементов, сделан вывод о перспективности их использования для создания твердотельных лазеров и оптических усилителей с высокой средней и пиковой мощностью. Далее по тексту автором сформулированы предмет исследования и актуальность темы, цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость, а также основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена описанию результатов исследований лазерных и термоопических характеристик твердотельных материалов, допированных ионами трехвалентного иттербия. Предложен метод диагностики лазерных сред, легированных иттербием, на предмет величины дополнительного тепловыделения, основанный на измерении нагрева образца. Исследован эффект нелинейного дополнительного тепловыделения в различных лазерных средах (Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:LuAG и др.). Предложен способ улучшения технологии роста лазерных кристаллов по методу Багдасарова. Исследован эффект нелинейного дополнительного тепловыделения в зависимости от температуры материала для дисковых и композитных активных элементов. Предложена модификация метода измерения сечения усиления и времени жизни в легированных иттербием активных средах с учетом перепоглощения излучения.

Во второй главе представлено подробное описание способов подавления тепловых искажений излучения в активных элементах. В частности, экспериментально исследовано влияние качества монтажа дискового активного элемента на эффективность его охлаждения и на фазовые искажения излучения. Показано, что наилучшим способом монтажа является приклейка дискового активного элемента на высокотеплопроводный диэлектрический радиатор. Экспериментально и теоретически исследовано влияние толщины и легирования дискового активного элемента на эффективность лазерной генерации. Показано, что уменьшение толщины диска с одновременным увеличением числа проходов накачки через активный элемент позволяет увеличить эффективность непрерывной лазерной генерации. При этом, минимальная толщина диска ( $\sim 150$  мкм) ограничена эффектом УСИ. Выполнено экспериментальное и теоретическое сравнение тепловых эффектов и усиления в дисковом Yb:YAG и композитном дисковом Yb:YAG/YAG активных элементах. Показано, что композитная структура активного элемента позволяет значительно улучшить эффективность охлаждения инверсной области, а также подавить такие эффекты как УСИ и нелинейное дополнительное тепловыделение. Разработан новый тип композитных дисковых активных элементов из разнородных материалов Yb:YAG/sapphire. Показано, что в таком типе композитных активных элементов можно обеспечить увеличенное (по сравнению с Yb:YAG/YAG) усиление и уменьшенную величину фазовых искажений за счёт более высокой теплопроводности сапфира. Экспериментально продемонстрировано, что величина фазовых искажений в композитном дисковом активном элементе может быть уменьшена путём наиболее оптимального подбора геометрии охлаждения его задней и боковой поверхностей.

Третья глава посвящена экспериментальной реализации дисковых лазеров с выходной мощностью киловаттного уровня. Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния

толщины/легирования дискового активного элемента на эффективность лазерной генерации. Показано, что уменьшение толщины диска с одновременным увеличением числа проходов накачки через активный элемент позволяет увеличить эффективность непрерывной лазерной генерации. При этом, минимальная толщина диска (~ 150 мкм) ограничена эффектом УСИ. На основе разработанных дисковых лазерных квантронов создан двухквантронный непрерывный дисковый лазер с выходной мощностью до 1 кВт и эффективностью лазерной генерации ~ 50%, работающий в режиме многомодовой генерации поперечных мод. Представлена новая схема неустойчивого кольцевого резонатора для дискового активного элемента с многопроходной геометрией распространения излучения, обеспечивающая качество лазерного излучения близкое к дифракционному при большом диаметре пучка накачки на активном элементе. Экспериментально показана работоспособность данной схемы, получен лазерный пучок хорошего качества, в том числе, и в непрерывном режиме работы лазера.

**В Заключении** представлен перечень основных результатов работы.

#### **Оценка новизны исследования**

В рамках диссертации М.Р.Волковым были разработаны и предложены новые методы диагностики лазерных сред, в том числе по изучению и способам подавления эффекта нелинейного дополнительного тепловыделения. Исследования в области оптимизации геометрии дисковых и композитных дисковых активных элементов позволили разработать дисковый лазерный квантрон, по своим характеристикам соответствующий мировому уровню, а также раскрыли особенности термонаведенных фазовых искажений в дисковых и композитных дисковых активных элементах. В частности, на этой основе был разработан и изготовлен новый тип композитных дисковых элементов из разнородных материалов (Yb:YAG/sapphire). На основе выполненных исследований разработан дисковый лазер киловаттного уровня средней мощности, а также реализована оригинальная схема неустойчивого резонатора.

Выносимые на защиту положения отражают новизну исследования и оригинальность полученных результатов.

**Оценка практической значимости результатов диссертационной работы.**

Выполненные исследования позволили оптимизировать метод роста кристаллов по технологии Багдасарова и значительно повысить их лазерные характеристики. Разработанный в рамках работы новый вид композитных дисковых активных элементов из Yb:YAG/sapphire имеет благоприятные перспективы использования в высокоэнергетических дисковых лазерных усилителях. Разработанный на основе отечественных технологий дисковый лазер киловаттного уровня мощности, являясь альтернативой зарубежным лазерным системам, может найти широкое применение в области технологической обработки материалов.

Полученные в диссертации результаты можно рекомендовать к использованию при исследованиях и разработках новых образцов лазерной техники в ФКП ГЛП "Радуга", АО "НИИ Полюс им. М.Ф.Стельмаха", АО НИИЭФА им. Д.В.Ефремова и РФЯЦ ВНИИЭФ.

**Оценка достоверности и обоснованности научных положений, результатов и выводов** базируется на хорошей методической проработке экспериментов, применении современных средств измерения и контроля, воспроизводимости результатов, сопоставлении полученных данных с результатами других исследователей.

**Основные результаты диссертации** опубликованы в 17 докладах и статьях, среди них 9 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК. Результаты работы были представлены на 6 международных и 2 российских конференциях.

**Замечания по диссертационной работе:**

Замечаний принципиального характера по содержанию и структуре диссертации нет. Можно отметить некоторую нечеткость и избыточный объем

формулировок основных положений, выносимых на защиту, а также в ряде случаев нехватку количественных характеристик обсуждаемых параметров. Так, например, из текста диссертации неясно, насколько в количественном выражении улучшается точность измерений спектроскопических параметров активной среды по предложенным соискателем методикам по сравнению с общепринятыми способами. Также к недостаткам работы следует отнести отсутствие анализа результатов сравнительного исследования генерационных характеристик дисковых и композитных активных элементов. В частности, автором диссертации не приведены пояснения, почему дифференциальная эффективность дисковых активных элементов выше, чем композитных структур, несмотря на преимущества композитов по силе термической линзы (меньше аналогичной величины для дисков) и коэффициенту одностороннего усиления (больше, чем у дисков), согласно данным рисунков 28(а-в). Кроме того, в приложении 2 значение коэффициента френелевского отражения от границы раздела сапфир - иттрий-алюминиевый гранат занижено на порядок, 0.004% вместо 0.04%.

### **Заключение**

В целом, диссертационная работа Волкова М.Р. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно. Работа выполнена на высоком научном уровне, в ней получен ряд перспективных результатов, представляющих значительный интерес для разработки новых эффективных источников лазерного излучения с высокой средней мощностью. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, тема которой соответствует специальности 01.04.21 – Лазерная физика. В опубликованных работах содержатся все основные результаты и выносимые на защиту положения. Текст диссертации характеризуется полнотой изложения и научной значимостью представленных результатов, оценок и выводов. Отмеченные недостатки не имеют принципиального

характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертационная работа Волкова Михаила Романовича на тему **«Подавление тепловых эффектов в иттербиевых дисковых лазерах киловаттного уровня средней мощности»** по объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению результатов, соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ и удовлетворяет требованиям "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертация рассмотрена, отзыв обсуждён и одобрен на научном семинаре ИЛФ СО РАН 16 сентября 2020 г.

Отзыв составил

Ватник Сергей Маркович

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Телефон: +7-913-938-75-23

электронная почта: [vatnik@laser.nsc.ru](mailto:vatnik@laser.nsc.ru)

 С.М.Ватник

#### **Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук.

Почтовый адрес: Проспект Академика Лаврентьева,

д. 15Б, г. Новосибирск, 630090.

Тел./факс (383) 333-20-67

E-mail: [info@laser.nsc.ru](mailto:info@laser.nsc.ru)

<http://www.laser.nsc.ru>