

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)**

**Влияние тепловых эффектов на оптическое качество лазерного излучения генераторов и  
усилителей с дисковыми активными элементами, легированными иттербием**

**Аспирант:** Волков Михаил Романович

---

**Научный руководитель:** Мухин Иван  
Борисович, к.ф.-м.н., с.н.с отдела 350

---

**Направление подготовки:**

03.06.01 Физика и астрономия

**Направленность (профиль) подготовки**

01.04.21 Лазерная физика

**Форма обучения:** очная

Нижний Новгород

2019

## Актуальность темы исследования

На 2019 год источники когерентного излучения высокой средней и пиковой мощности нашли применение в широком кругу практических задач (томография в медицине, интроскопия в сфере безопасности, обработка материалов в промышленности).

Специфика лазеров, работающих с высокой средней мощностью – это неизбежный нагрев активной среды, как следствие – тепловые эффекты, ухудшающие качество лазерного пучка и ограничивающие максимальную мощность. Для её повышения необходимо минимизировать источники тепла и потери излучения в активных средах лазеров.

Концепция дискового лазера – одна из нескольких, демонстрирующих рекордные на настоящее время мощности излучения [1]. В качестве активной среды, как правило, используется алюмоиттриевый гранат, легированный иттербием ( $\text{Yb:YAG}$ ). Масштабирование мощности дискового лазера связано с повышением концентрации иона-активатора, и/или увеличением апертуры активного элемента. Первое приводит к появлению дополнительных источников тепла [2], второе – к усугублению эффекта УСИ [3]. На сегодняшний день нет достоверного объяснения механизма дополнительных источников. В диссертационной работе разработан оригинальный способ исследования материалов на предмет силы этого эффекта, а также предложены некоторые способы его уменьшения.

Также актуальной задачей является применение новых материалов для дисковых лазеров, обладающих улучшенными тепловыми или спектральными характеристиками. Такие материалы как  $\text{Yb:LuAG}$  или  $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$  обладают значительно большей теплопроводностью. Однако, эти материалы доступны только в виде лазерной керамики. Применение керамических лазерных сред с разупорядоченной структурой (например,  $\text{Yb:(LuYSc)}_2\text{O}_3$  позволяет значительно увеличить ширину полосы усиления. Необходимо иметь простые и надежные методы контроля и измерения лазерных характеристик новых сред. В диссертационной работе разработаны новые и оптимизированы известные методы измерения различных характеристик лазерных сред, легированных иттербием и исследован ряд материалов.

Другой важной научной проблемой дисковых лазеров является повышение их характеристик при работе в импульсном режиме. Для продвижения импульсно-периодических дисковых лазеров в суб-кВт диапазон применяются криогенные технологии охлаждения активного элемента, что значительно усложняет конструкцию и возможности использования таких лазеров. Запасание энергии в тонком дисковом элементе ограничено его малой толщиной, которая необходима для эффективного

охлаждения. Таким образом, задача работы дисковых лазеров в одновременно с высокой средней и пиковой мощностью является по-прежнему актуальной. Применение композитных активных элементов позволяет увеличить запасаемую энергию, однако, приводит к термонаведенным искажениям излучения. В работе предложен новый тип композитных дисковых активных элементов из Yb:YAG/sapphire с уменьшенной величиной термонаведённых искажений.

Многие приложения дисковых лазеров требуют средней мощности излучения вплоть до десятков кВт с высокой яркостью лазерного пучка. Несмотря на известное принципиальное устройство дисковых лазеров, технология их изготовления с мульти-кВт выходной мощностью и более доступна только двум немецким компаниям (Trumpf, Dausinger&Giesen). Отметим, что в России практически не ведется исследований по созданию высокомоощных твердотельных лазеров. Поэтому, повышение технологического уровня при исследовании и улучшении дисковых лазеров является одной из актуальных задач. Так, одной из специфик дискового лазера является малый коэффициент усиления излучения за проход активного элемента. В результате, в дисковых лазерах, как правило, применяются устойчивые лазерные резонаторы. С учетом масштабирования дисковых лазеров путем увеличения рабочей апертуры, начиная с уровня мощности в несколько кВт, встает проблема согласования диаметра основной моды устойчивого резонатора с диаметром накачки. Применение различного рода адаптивной оптики позволяет продвинуться в больший диапазон мощностей, но не решает проблемы сильного усложнения юстировки лазера. Эта проблема может быть решена применением неустойчивого резонатора. Однако малая величина усиления не позволяет совмещать дисковый квантрон и неустойчивый лазерный резонатор напрямую. Таким образом, повышение средней мощности и яркости дисковых лазеров по-прежнему является актуальной задачей.

### **Цели исследования**

Целью настоящей диссертационной работы является исследование тепловых и лазерных характеристик дисковых активных элементов, а также применение таких элементов для генерации и усиления излучения в условиях высокой средней по времени мощности. В частности, исследование таких характеристик легированных иттербием лазерных сред, как сечение поглощения и усиления, время жизни, поглощение, эффект дополнительного тепловыделения. Разработка оптимальных способов накачки и охлаждения дисковых активных элементов и путей подавления возникающих термонаведенных искажений

излучения. Применение выполненных исследований и разработок для создания лазеров с высокой средней мощностью.

### **Научная новизна**

Научная новизна данной работы подтверждается большим количеством публикаций в высоко рейтинговых журналах по тематике данного диссертационного исследования. В работе предложены новые методы исследования лазерных сред и на основе этих методов выполнены измерения ряда новых материалов. Отдельной строкой можно выделить исследования по диагностике и подавлению 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 и методы их подавления. В частности, предложен, разработан и изготовлен новый тип композитных дисковых элементов из разнородных материалов (Yb:YAG/sapphire). Разработана оригинальная схема неустойчивого резонатора с дисковым активным элементом, разрешающая проблему масштабирования поперечного размера моды в лазере с широкой апертурой активного элемента

### **Научная и практическая ценность 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 значительные 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.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием предварительным теоретическим оценкам, теоретическим и экспериментальным зависимостям, построенным в более ранних работах, а также сторонних источниках данных, приведенных в списке цитируемой литературы.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1. Предложен метод диагностики лазерных сред, легированных иттербием, на предмет величины нелинейного тепловыделения. Метод основан на измерении нагрева образца при его освещении пучком излучения на резонансной и нерезонансной длинах волн. Экспериментально продемонстрирована корреляция между величиной нелинейного тепловыделения, измеренной предложенным методом и нагревом дисковых активных элементов в условиях наличия и отсутствия лазерной генерации. Эффект нелинейного нагрева исследован в зависимости от температуры и от структуры активного элемента. Показано, что наличие нелегированного слоя в композитном активном элементе снижает данный эффект.
2. Исследован эффект нелинейного дополнительного тепловыделения в различных лазерных средах (Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:LuAG, ...), различных производителей и различного легирования. Показано, что данный эффект зависит от величины легирования и величины остаточных примесей в материалах.
3. Показано, что эффективность генерации в кристаллах, выращенных методом Багдасарова ниже, чем в выращенных методом Чохральского. Предложен способ по улучшению метода Багдасарова. Продемонстрировано значительное увеличение эффективности генерации излучения в кристаллах, выращенных улучшенным методом.
4. Предложена модификация метода измерения сечения усиления и времени жизни в легированных иттербием активных средах. Показано, что данные методы позволяют избежать ошибки, внесённой перепоглощением излучения, что дает возможность диагностики активных элементов с большой толщиной. С помощью модифицированного метода исследованы спектры сечения усиления и время жизни в ряде лазерных сред (Yb:YAG, Yb:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Yb:LuAG, Yb:CaF<sub>2</sub>, Yb:Glass, ...).
5. 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 исследовано влияние температуры охлаждающей воды и её потока на эффективность генерации дискового лазера. Показано, что дифференциальная эффективность растет при понижении температуры или повышении потока воды. Продемонстрирована непрерывная лазерная генерация с оптической эффективностью более 50%.

6. 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.
7. 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. Однако, увеличение толщины активного элемента за счет нелегированной части приводит к дополнительным фазовым искажениям излучения («тепловой линзе»), в частности из-за наличия остаточного нерезонансного поглощения в YAG.
8. Разработан новый тип композитных дисковых активных элементов из разнородных материалов Yb:YAG/sapphire. Изготовлены такие активные элементы методом термодиффузионной сварки. На изготовленных активных элементах продемонстрирована высокоэффективная лазерная генерация, измерена величина усиления, поляризационных и фазовых искажений излучения. Показано, что в таком типе композитных активных элементов можно обеспечить увеличенное (по сравнению с Yb:YAG/YAG) усиление и уменьшенную величину фазовых искажений за счет более высокой теплопроводности сапфира.
9. Экспериментально и теоретически продемонстрировано, что величина фазовых искажений в композитном дисковом активном элементе может быть уменьшена путем наиболее оптимального подбора диаметра накачки.
10. На основе разработанных дисковых лазерных квантронов создан двухквантронный непрерывный дисковый лазер с выходной мощностью до 1 кВт и эффективностью лазерной генерации  $\sim 50\%$ , работающий в режиме многомодовой генерации поперечных мод.
11. Разработана 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 (что характерно для дисковых лазеров с мульти-кВт средней мощностью). Экспериментально показана

работоспособность данной схемы, получен лазерный пучок хорошего качества, в том числе, и в непрерывном режиме работы лазера.

### **Апробация результатов**

Результаты работы были представлены на следующих конференциях:

- EUROPHOTON 2016, 7th EPS-QEOD Europhoton Conference 2016, Вена, Австрия
- Advanced Solid State Lasers Conference and Exhibition (ASSL) (Бостон, Массачусетс, США, 2016)
- Оптика лазеров 2016, Санкт-Петербург (Россия)
- CLEO Pacific Rim 2018, Гонконг (Китай), 2 доклада
- XXII Нижегородская сессия молодых учёных, (Нижегородская область, 2017)
- XVII Научная Школа «Нелинейные волны», (Нижегородская область, 2016)

### **Личный вклад автора**

Научным руководителем были поставлены задачи и определены основные направления исследования. Основные результаты диссертационной работы были получены либо автором лично, либо при его непосредственном участии совместно с И.И. Кузнецовым, И.Б. Мухиным, О.В. Палашовым, И.Л. Снетковым, и Е.А. Перевезенцевым. В основу экспериментальных исследований автора легли работы И.И. Кузнецова в области мощных дисковых лазеров

### **Структура работы**

Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, приложений и списка цитируемой литературы, включающего и работы автора. Общий объём работы составляет 68 страниц, включая 37 рисунков и 4 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 56 источников.

### **Краткое содержание работы**

Во введении представлены наиболее значимые научные и практические результаты, достигнутые мировыми лидерами в области дисковых лазеров[1]. Приведены основные принципы, на которых построена данная идея, указаны её ключевые особенности, способы масштабирования, а также основные причины, по которым оно затруднено. Так, глубокое охлаждение активной среды требует криогенного и вакуумного оборудования,

что увеличивает сложность конструкции. Масштабирование за счёт увеличения размеров активной среды ограничено эффектом УСИ[3]. Применение композитной структуры активного диска оправдано только при наличии отработанной технологии для его изготовления.

В первой главе сделано исследование ключевых параметров активных сред, применяемых в дисковых лазерах. Измерена эффективность лазерной генерации в кристаллах Yb:YAG, выращенных разными способами. Показано, что эффективность генерации кристаллов, выращенных методом Чохральского, достигает 50%. В аналогичных условиях кристаллы, выращенные методом Багдасарова[4], имеют более низкую эффективность. При этом последние демонстрируют повышенный нагрев в условиях работы лазера, не соответствующий численным оценкам, в то время как температура кристаллов Чохральского не превышает расчётных величин при условии лазерной генерации. Для повышения качества кристаллов Багдасарова предложено использовать тигли с вольфрамовым покрытием. Продемонстрирован положительный эффект такого решения. Для диагностики кристаллов Yb:YAG на наличие дополнительного нагрева предложен оригинальный метод[5]. Данный метод основан на измерении температуры образцов при просвечивании на резонансной длине волны 1030 нм. Ключевой момент в данном методе – отрицательный дефект кванта, который приводит к охлаждению лазерной среды в отсутствие дополнительных источников нагрева. Показано, что кристаллы Багдасарова, имеющие повышенную температуру при работе в лазере, нагреваются также и при просвечивании на 1030 нм, чего не наблюдается в кристаллах Чохральского вплоть до легирования 8%. Однако, кристаллы любого метода роста имеют повышенный нагрев при легировании 10% и выше[2], как при работе лазера, так и при просвечивании на 1030 нм. Было сделано сравнение данного эффекта в простом и в композитном дисковых активных элементах, и показано, что наличие нелегированного слоя снижает этот эффект. Также в первой главе предложены модификации существующих методов [6, 7] измерения сечений усиления и времён жизни в иттербиевых средах, которые позволяют устранить ошибку, внесённую захватом излучения. Модифицированные методы применены на практике.

Во второй главе исследованы способы снижения термонаведённых эффектов применительно к дисковым лазерам. Исследованы разные способы монтажа активных дисков на радиатор, найден удобный способ, который позволяет добиться однородного охлаждения с малым тепловым сопротивлением, тем самым снижая неоднородность нагрева. Измерено влияние температуры и расхода охлаждающей воды на эффективность генерации. Путём численного расчёта найдены такое легирование и толщина активного

диска, чтобы при эффективном поглощении накачки и усилении сигнала одновременно снизить тепловые эффекты. Изготовлены дисковые активные элементы, демонстрирующие мощность лазерной генерации в 600 Вт при КПД 50%. Показано, что фазовые искажения в композитном активном элементе обусловлены в том числе поглощением света в нелегированном слое. Предложены способы подавления фазовых искажений в композитных активных элементах, путём применения сапфира вместо граната, для нелегированного слоя, а также путём подбора диаметра накачки. Работоспособность данных способов продемонстрирована экспериментально, с использованием композитов, изготовленных путём термодиффузионной сварки в отделе 350.

В третьей главе сделан небольшой обзор по основным отечественным результатам в области лазеров киловаттной мощности на длине волны 1 мкм. Поскольку доминирующее положение в данной области занимают волоконные лазеры [8, 9], а разработок иных геометрий мало [10, 11], предложена схема киловаттного лазера на основе дисковых квантронов, разработанных в предыдущей главе. В данной схеме применён резонатор, осуществляющий перенос изображения лазерной моды между двумя активными дисками. Такой подход позволяет масштабировать мощность путём добавления большого количества идентичных дисковых квантронов в общий резонатор. В настоящей схеме продемонстрирована лазерная генерация мощностью 1 кВт в схеме с двумя дисковыми квантронами. Также, в третьей главе предложена оригинальная схема неустойчивого кольцевого лазерного резонатора, способного работать при малом усилении в дисковом активном элементе. Данный резонатор позволил получить лазерный пучок высокого качества,  $M^2$  от 2 до 4.5 при дифференциальной эффективности в 30% [12].

#### **Публикации автора по теме диссертации**

[A1] - Волков М. Р., Кузнецов И. И., Мухин И. Б., Палашов О. В., «Дисковые квантроны на основе Yb:YAG для лазеров мультикиловаттной средней мощности» // Квантовая Электроника, т. 49 (2019), №4, стр. 354-357

[A2] - Волков М. Р., Кузнецов И. И., Мухин И. Б., Палашов О. В., Конященко А. В., Теняков С. Ю. и Ливенцов Р.А., «Тонкостержневые активные элементы для усиления фемтосекундных импульсов» // Квантовая электроника, т. 49, (2019), №4, pp. 350-353

[A3] - 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, vol. 36, 5 (2019) pp. 1370-1375

- [A4] - E.A. Mironov, M.R. Volkov, O.V. Palashov, D.N. Karimov, E.V. Khaydukov, I.A. Ivanov, «Thermo-optical properties of EuF<sub>2</sub>-based crystals» // *APPLIED PHYSICS LETTERS*, vol. 114, 7 (2019) p. 073506.
- [A5] - Volkov M. R., Kuznetsov I. I. and Mukhin I. B., «A New Method of Diagnostics of the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media» // *IEEE Journal of Quantum Electronics* vol. 54, (2018), №1, pp. 1-6
- [A6] - Snetkov I. L., Ding Z., Yakovlev A. I., Volkov M. R., Kuznetsov I. I., Mukhin I. B., Palashov O. V., Ying S. and Ken-ichi U., «Laser generation on Yb:LuAG ceramics produced by nanocrystalline pressure-less sintering in H<sub>2</sub> » // *Laser Physics Letters* vol. 15, 2018, p. 035801
- [A7] - Р. Н. Максимов В. А. Шитов М. Р. Волков О. Л. Вадимова И. Л. Снетков, «Спектрально-люминесцентные и генерационные характеристики керамики на основе твердого раствора Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, активированного Yb<sup>3+</sup>» // *Квантовая электроника*, т. 48 (2018), №8, стр. 695-698.

1. V. Kuhn, T. Gottwald, C. Stolzenburg, S.-S. Schad, A. Killi, and T. Ryba, "Latest advances in high brightness disk lasers," in *Solid State Lasers XXIV: Technology and Devices* (SPIE, 2015),
2. M. Larionov, K. Schuhmann, J. Speiser, C. Stolzenburg, and A. Giesen, "Nonlinear Decay of the Excited State in Yb:YAG," in *Advanced Solid-State Photonics*, (2005), p. TuB49.
3. D. Kouznetsov, J.-F. Bisson, J. Dong, and K.-i. Ueda, "Surface loss limit of the power scaling of a thin-disk laser," *Journal of the Optical Society of America B* 23, 1074-1082 (2006).
4. M. Arzakantsyan, N. Ananyan, V. Gevorgyan, and J. C. Chanteloup, "Growth of large 90 mm diameter Yb:YAG single crystals with Bagdasarov method," *Optical Materials Express* 2, 1219-1225 (2012).
5. M. R. Volkov, I. I. Kuznetsov, and I. B. Mukhin, "A New Method of Diagnostics of the Quality of Heavily Yb-Doped Laser Media," *IEEE Journal of Quantum Electronics* 54, 1-6 (2018).
6. H. Kühn, S. T. Fredrich-Thornton, C. Kränkel, R. Peters, and K. Petermann, "Model for the calculation of radiation trapping and description of the pinhole method," *Optics Letters* 32, 1908-1910 (2007).
7. H. Kühn, K. Petermann, and G. Huber, "Correction of reabsorption artifacts in fluorescence spectra by the pinhole method," *Optics Letters* 35, 1524-1526 (2010).
8. V. Fomin, M. Abramov, A. Ferin, A. Abramov, D. Mochalov, N. Platonov, and V. Gapontsev, "10kW Single Mode Fiber Laser," in *14th International Conference "Laser Optics 2010"*, Symposium on High-Power Fiber Lasers 2010),
9. V. Fomin, V. Gapontsev, E. Shcherbakov, A. Abramov, A. Ferin, and D. Mochalov, "100 kW CW fiber laser for industrial applications," in *2014 International Conference Laser Optics*, (2014), 1-1.
10. R. V. Balmashnov, A. S. Davtian, Y. V. Katsev, A. F. Kornev, I. G. Kuchma, and D. O. Oborotov, "0.53 J /100 ps Nd:YAG single-rod six-pass amplifier," in *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)*, (2018), 53-53.
11. B. G. Malinin, A. A. Mak, V. M. Volynkin, K. V. Gratsianov, A. S. Eremenko, V. M. Mit'kin, V. G. Pankov, V. A. Serebryakov, V. I. Ustyugov, S. A. Chizhov, and V. E. Yashin, "A kilowatt, two-waveguide slab laser," *Opticheskii jurnal* 2000, 67 (6) 66-69 70, 905-907 (2003).
12. M. R. Volkov, I. B. Mukhin, I. I. Kuznetsov, and O. V. Palashov, "Thin-disk laser with multipass unstable ring resonator," *Journal of the Optical Society of America B* 36, 1370-1375 (2019).

