

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИПФ РАН

академик Е.А. Хазанов



« 2 » апреля 2021 г.

### ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертацию Ведина Ивана Александровича  
«Генерационные характеристики дисковых лазеров на основе двойных калий-редкоземельных вольфраматов  $Tm^{3+}:KRE(WO_4)_2$ , RE = Y, Lu», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.21 – лазерная физика**

Разработка источников когерентного излучения, эффективно работающих среднем ИК диапазоне длин волн, представляет значительный интерес для решения многочисленных как прикладных, так и научных задач. В частности, особенно актуальным является задача создания широкополосных или перестраиваемых источников излучения, а также фемтосекундных источников с длиной волны вблизи 2 мкм. Одними из наиболее перспективных лазерных сред для таких задач являются кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов, благодаря широкому и относительно монотонному спектру сечения усиления в области 1850-1950 нм. Другим преимуществом этих лазерных сред (по сравнению с многими другими кристаллами, легированными тулием) является возможность их оптической накачки излучением в диапазоне 800-810 нм – наиболее распространенными лазерными диодными источниками излучения. Однако основным недостатком этого материала является их относительно небольшая теплопроводность, что ограничивает среднюю мощность излучения лазерных источников на основе двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированных тулием.

В диссертационной работе исследуется вопрос повышения средней мощности лазеров с активными элементами из  $Tm:KYW$ ,  $Tm:KLuW$ . Для этого предлагается использовать дисковую геометрию активных элементов, а для дополнительного

повышения средней мощности – применение композитной структуры дисковых активных элементов, что является новым подходом для тулиевых лазеров.

Структурно диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списков цитируемой литературы и публикаций по теме диссертации.

**Во введении** обосновывается актуальность и научная значимость работы, сформулированы цели, кратко излагается содержание диссертации, приведены выносимые на защиту положения.

**Первая глава** во многом является обзорной. В ней дана краткая информация о новых перспективных кристаллах двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Описывается технология выращивания исследуемых образцов высококачественных монокристаллов и эпитаксиальных структур, технология изготовления аналога эпитаксиальных структур – композитных кристаллов – методом высокотемпературного диффузионного сращивания в вакууме. Приведены первые результаты диссертационного исследования по генерации излучения в кристаллах  $Tm:KYW$ .

**Во 2-й главе** приведены результаты экспериментальных исследований генерационных характеристик тонких лазерных дисков на основе монокристаллов  $KY(WO_4)_2$  легированных 15 ат.%  $Tm^{3+}$ . Показано, что оптимизация таких параметров как толщина активного элемента, длина резонатора, коэффициент пропускания и радиус кривизны выходного зеркала, а также метод фокусировки излучения накачки в активный элемент, позволяют достигнуть мощности генерации более 4.9 Вт, соответствующей полной оптической – 25% и дифференциальной – 32% эффективностям.

**В 3-й главе** исследуются генерационные характеристики дисковых активных элементов на основе эпитаксиальных структур  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$  с толщиной активного слоя от 80 до 450 мкм, с концентрацией от туллия от 5 до 15 ат.%. Проведен сравнительный анализ выходных генерационных характеристик в зависимости от конфигурации активного элемента, а также параметров резонатора. Изучена «структурированная» форма спектра выходного излучения дискового  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$  лазера, который представляет собой совокупность нескольких отдельных не эквидистантных пиков со спектральной шириной менее 1 нм.

**В 4-й главе** представлены результаты сравнительных исследований генерационных характеристик набора дисковых элементов на основе монокристаллов  $5at.\%Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$  и композитных структур  $5at.\%Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$ . На образце композита с толщиной активного слоя 250 мкм получена мощность генерации

около 5 Вт в непрерывном режиме на длине волны 1.85 мкм с дифференциальной эффективностью  $\sim 40\%$ . Показано, что использование в качестве активных элементов лазеров композитных и эпитаксиальных структур  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  позволяет увеличить предельную плотность энергосъема более, чем в три раза, по сравнению с дисками  $5\text{at.}\% \text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  при одинаковой толщине активного слоя.

**В заключении** обсуждаются результаты работы. Основным результатом работы можно считать значительное повышение средней мощности (с менее Ватта до 5 Ватт) и эффективности генерации (с  $\sim 30$  до  $\sim 40\%$ ) тулиевых лазеров с активными элементами из кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов за счет применения дисковой композитной геометрии активных элементов. При этом, многие подходы (например, технология изготовления композитных активных элементов  $\text{Tm}^{3+}:\text{KLu}(\text{WO}_4)_2/\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$  методом термодиффузионной сварки) являются оригинальными. Достигнутые для данного типа кристаллов результаты являются рекордными и на сегодняшний день, согласно обзорной работе [S. Tomilov et al, “Moving towards high-power thin-disk lasers in the 2  $\mu\text{m}$  wavelength range”, J. Phys. Photonics 3 (2021) 022002].

По материалам диссертации опубликовано 12 работ в ведущих рецензируемых научных журналах, результаты исследований доложены на различных международных и российских конференциях. Текст диссертации изложен на 122 страницах и содержит 72 ссылки на цитируемую литературу.

К диссертационной работе можно отметить следующие комментарии и замечания.

Высокое оптическое качество материала дискового активного элемента является во многом определяющим для эффективной генерации дисковых лазеров. Однако, в тексте диссертации не представлено результатов измерений таких основных характеристик активных элементов как «холодная» деполяризация излучения или профиль фазового набега при отражении от диска. Такая информация важной, например, для оценки качества изготовления композитных активных элементов.

В рамках диссертационного исследования достигнуто значительное повышение средней мощности лазеров на основе кристаллов двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированных тулием. Однако, в работе не обсуждаются основные физические ограничения дальнейшего повышения средней мощности лазеров на основе таких активных элементов.

Первая глава диссертации называется «Литературный обзор», но содержит, в основном, справочную информацию и описание технологий изготовления кристаллов и композитных структур (некоторые из которых было бы уместней представить, например, приложениями к диссертации), а также некоторые научные результаты диссертационной работы. Такая структура осложняет восприятие научных результатов, представленных в 1-й главе.

Перечисленные замечания носят частный характер и не умаляют достоинств диссертационной работы. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

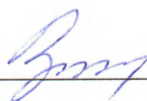
Материалы диссертации представлены и рассмотрены на научном семинаре отделения нелинейной динамики и оптики ИПФРАН от 21.04.2021.

Отзыв составил:

старший научный сотрудник

отдела диагностики оптических материалов

для перспективных лазеров, к. ф.-м. н.



Мухин И.Б.

Сведения о составителе отзыва:

Мухин Иван Борисович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела диагностики оптических материалов для перспективных лазеров ИПФРАН, E-mail: [ivan.mukhin@ipfran.ru](mailto:ivan.mukhin@ipfran.ru), Тел. +7 (831) 416-06-74

Сведения о ведущей организации:

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

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, Бокс-120, ул. Ульянова, 46

Web: <https://ipfran.ru/>

Тел.: +7 (831) 436-62-02