

*На правах рукописи*



Жмыхов Вадим Юрьевич

**СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОЙ КЕРАМИКИ,  
АКТИВИРОВАННОЙ ИОНАМИ ИТТЕРБИЯ И ЭРБИЯ**

1.3.19. Лазерная физика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

**Научный руководитель:** Добрецова Елена Анатольевна, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории Активных сред твердотельных лазеров отдела лазерных кристаллов и твердотельных лазеров научного центра лазерных материалов и технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук».

**Официальные оппоненты:**

**Селезнев Леонид Владимирович**, доктор физико-математических наук, высококвалифицированный ведущий научный сотрудник лаборатории газовых лазеров Отделения квантовой радиофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

**Климин Сергей Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории спектроскопии конденсированных сред Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт спектроскопии Российской академии наук.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых".

Защита состоится 08 июня 2026 года в 16:30 на заседании диссертационного совета 24.1.223.03 при ИОФ РАН по адресу: г. Москва, ул. Вавилова, д. 38, корп. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИОФ РАН <https://diss.gpi.ru/all/>

Автореферат разослан:

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.223.03

канд. физ.-мат. наук  
тел.: +7 (499) 503-8780



Осадчий Александр Валентинович

## Общая характеристика работы

### Актуальность исследуемой проблемы

Лазерная керамика как поликристаллический материал твердотельной квантовой электроники [1] за последние десятилетия утвердилась в качестве конкурентоспособной альтернативы монокристаллам и стеклам при создании активных сред для импульсных и непрерывных лазерных систем [2]. При создании лазера для конкретных применений необходимо учесть ряд факторов, таких как компактность и надежность конструкции, простота в обслуживании, безопасность эксплуатации, высокая выходная мощность, тип активной среды, экологическая безопасность. Сочетание высокой пиковой и средней мощности излучения является принципиальным вопросом для многих применений. В этом случае остро встает проблема производства и характеризации монокристаллов и лазерной керамики высокого качества.

Одной из хорошо известных и изученных активных сред для лазеров высокой пиковой мощности являются легированные РЗ ионами кристаллы иттрий-алюминиевого граната ( $RE^{3+}$ :ИАГ,  $Y_3Al_5O_{12}$ ) [3, 4].

Монокристаллы  $RE^{3+}$ :ИАГ широко используются для различных применений. Несмотря на успешное применение монокристаллов иттрий-алюминиевого граната в лазерных технологиях [5-15], их использование ограничено технологическими сложностями синтеза крупноразмерных образцов, высокой себестоимостью и ограниченными возможностями управления теплофизическими и спектральными характеристиками. В этом контексте прозрачная керамика на основе гранатовых структур представляет собой стратегическое направление развития лазерных материалов нового поколения.

С материаловедческой точки зрения лазерная керамика является поликристаллическим материалом, оптические свойства которого достигают уровня монокристаллов за счёт минимизации дефектов структуры.

Поликристаллическая керамика представляет собой материал, структура которого образована множеством микроскопических кристаллитов (зёрен) хаотичной пространственной ориентации, с размерами, варьирующимися в диапазоне от сотен нанометров до нескольких десятков микрометров.

Первый практически значимый материал в этой области – прозрачный оксид алюминия [16]. Впоследствии были созданы прозрачные керамические образцы на основе разнообразных соединений: оксидов, фторидов, нитридов и других [17].

Совершенствование технологии синтеза, позволившее добиваться высокой прозрачности и структурной однородности, привело к важному выводу: плотный поликристаллический материал с высокой чистотой и изотропными свойствами по оптическим характеристикам сопоставим с монокристаллом.

Исторически прорыв в этой области произошёл в 1995 г., когда группа японских исследователей синтезировала  $Nd^{3+}$ :ИАГ керамику с оптическим

пропусканием, сопоставимым с монокристаллами, и выходной мощностью 70 мВт в непрерывном режиме [18].

Преимущества керамических активных сред включают возможность синтеза крупногабаритных элементов с однородным распределением активатора, что критически важно для масштабирования лазерных систем, а также гибкость в модификации состава, позволяющую целенаправленно корректировать спектральные и теплофизические параметры материала [19]. Помимо этого, керамика демонстрирует улучшенные механические характеристики и устойчивость к термооптическим искажениям по сравнению с монокристаллами, что расширяет её эксплуатационные возможности в лазерах высокой средней мощности. Важным аспектом является снижение себестоимости производства благодаря отказу от энергоёмких методов кристаллизации, заменяемых технологиями спекания нанопорошков с контролируемой гранулометрией и добавками, ингибирующими рост зерен [20].

Особый интерес представляют скандий-содержащие гранаты (ИСАГ), введение  $Sc^{3+}$  в кристаллическую решётку которых индуцирует разупорядочение структуры [21,22], позволяя целенаправленно модифицировать спектрально-люминесцентные характеристики. Пионерские работы советских учёных, включая исследования Жарикова Е.В., Каминского А.А. и др., [23] заложили теоретическую основу для современных разработок в этой области. Однако синтез ИСАГ лазерной керамики сопряжён с технологическими сложностями, такими как необходимость стабилизации гомогенной структуры при спекании, что требует разработки инновационных подходов к подготовке нанопорошковых прекурсоров с контролируемой морфологией и дисперсностью.

Несмотря на значительный прогресс в разработке лазерной керамики, ряд ключевых проблем остаётся нерешённым. Особую сложность представляет оптимизация режимов спекания, направленная на минимизацию оптических потерь в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового до инфракрасного, – что критически важно для расширения функциональных возможностей керамики в специализированных применениях. Ограниченное понимание механизмов формирования межзеренных границ в многокомпонентных системах, подобных ИСАГ, создаёт барьеры для управления микроструктурой и стабильностью материала. Эти проблемы требуют комплексного подхода, объединяющего углублённое исследование процессов спекания с усовершенствованием методов синтеза оптической керамики, что позволит установить взаимосвязь между технологическими параметрами и спектрально-люминесцентными, а также генерационными характеристиками материалов.

## **Цели и задачи работы**

Целью работы являлся анализ спектральных и генерационных характеристик лазерных керамик на основе ИАГ (ИСАГ), легированных

редкоземельными ионами иттербия и эрбия, а также выявление взаимосвязи между технологией получения и их оптическими и генерационными характеристиками для оптимизации процесса синтеза лазерной керамики.

Для достижения заявленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование оптических характеристик керамических образцов  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ и  $\text{Er}^{3+}$ :ИАГ.

2. Исследование спектрально-люминесцентных характеристик керамических образцов  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ.

3. Исследование генерационных характеристик образцов керамик  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ.

4. Исследование температурных зависимостей спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик образцов керамик  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ.

### **Научная новизна**

1. Впервые получены экспериментальные данные о температурной зависимости радиационного времени жизни уровня  ${}^2F_{5/2}$  иона  $\text{Yb}^{3+}$  в керамике  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ в диапазоне 77–400 К, демонстрирующей рост времени жизни от ~1,0 мс при 77 К до ~1,6 мс при 400 К. Анализ экспериментальных данных в сопоставлении с литературными результатами показывает, что наблюдаемый рост времени жизни обусловлен замедлением температурно-зависимой миграции энергии возбуждения по ионам  $\text{Yb}^{3+}$  и, как следствие, снижением вероятности переноса энергии к неконтролируемым центрам тушения.

2. Впервые продемонстрирована высокоэффективная лазерная генерация ( $\text{КПД}_{\text{дифф.}} = 74,9\%$ ) в керамических образцах  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ. Данный результат достигнут благодаря комплексной оптимизации процесса синтеза, в рамках которой применение метода обратного соосаждения для изготовления исходных нанопорошков обеспечило формирование химически однородного керамического материала.

3. Впервые экспериментально реализован твердотельный лазер с диодной накачкой на основе оптически изотропной керамики  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ, демонстрирующий генерацию линейно-поляризованного излучения на длине волны 1,03 мкм (электронный переход  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$  в ионе  $\text{Yb}^{3+}$ ).

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы связана с анализом взаимосвязи между технологией изготовления, составом и функциональными характеристиками скандий-содержащей керамики, легированной ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ . В ходе исследования рассмотрено влияние вариаций состава на оптические и генерационные параметры материала.

Практический аспект работы связан с исследованием возможности использования отечественных керамических материалов на основе ИАГ и ИСАГ в качестве альтернативы монокристаллическим активным средам. Продемонстрирована высокая эффективность твердотельного лазера с диодной накачкой на основе керамики  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ, обеспечивающего генерацию линейно поляризованного излучения на длине волны 1,03 мкм. Для керамики состава  $\text{Y}_{2,52}\text{Yb}_{0,25}\text{Sc}_{0,38}\text{Al}_{4,85}\text{O}_{12}$  выявлена температурная зависимость положения плоскости поляризации генерации. Наблюдаемый эффект представляет интерес для дальнейшего изучения в контексте разработки поляризационно-чувствительных элементов лазерных систем.

Полученные результаты могут быть использованы при корректировке технологических параметров изготовления лазерной керамики с использованием метода обратного соосаждения с целью управления спектрально-люминесцентными и генерационными характеристиками керамики применительно к задачам лазерной техники.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Экспериментально показано, что радиационное время жизни люминесценции уровня  ${}^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в керамике  $\text{Yb}$ :ИСАГ увеличивается с повышением температуры в диапазоне 77-400 К. Анализ результатов указывает, что данная тенденция обусловлена замедлением температурно-зависимой миграции энергии возбуждения по ионам  $\text{Yb}^{3+}$  и, как следствие, снижением вероятности переноса энергии к неконтролируемым центрам тушения, что согласуется с ранее описанными для  $\text{Yb}$ -содержащих гранатов механизмами.

2. Для лазерной керамики  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ достигнут дифференциальный КПД генерации 74,9%. Установлено, что такой уровень эффективности обеспечивается комплексной оптимизацией отечественной технологии синтеза, ключевым этапом которой является применение метода обратного соосаждения при получении исходных нанопорошков.

3. Впервые реализована генерация стабильного линейно-поляризованного излучения (1,03 мкм) в изотропной по структуре лазерной керамике  $\text{Yb}$ :ИСАГ, что расширяет ее применение в лазерных системах. Экспериментально обнаружен эффект поворота плоскости поляризации на  $90^\circ$  при нагреве в керамике состава  $\text{Y}_{2,52}\text{Yb}_{0,25}\text{Sc}_{0,38}\text{Al}_{4,85}\text{O}_{12}$ .

### **Личный вклад автора**

Все результаты, представленные в диссертационной работе, были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Обсуждение и интерпретация

полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

### **Апробация работы**

Результаты исследований, вошедших в работу, представлены в 9 докладах на международных и всероссийских конференциях и школах-семинарах: 8th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics and Nanostructures (Санкт-Петербург, 2021); Школа-конференция молодых ученых ИОФ РАН «Прохоровские недели» (Москва, 2021); 2022 International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт-Петербург, 2022); XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» («Волны-2022») (Москва, 2022); XXIX Международная конференция Advanced Laser Technologies (ALT 22) (Москва, 2022); 2024 International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт-Петербург, 2024).

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из которых 9 в трудах конференций, 4 в рецензируемых журналах из списка WoS и перечня ВАК. Список публикаций по теме диссертации приведён в конце автореферата.

### **Методология и методы исследования**

В ходе выполнения диссертационной работы был применен комплексный методологический подход, направленный на установление взаимосвязи между составом, структурой и функциональными свойствами синтезированной лазерной керамики. Методология исследования была построена на последовательной реализации трех взаимосвязанных этапов, объединяющих методы оптической спектроскопии, лазерной физики и численного анализа.

Спектрально-люминесцентная характеристика с целью определения ключевых оптических параметров и их температурной динамики.

Исследование генерационных характеристик для оценки лазерного потенциала материалов в реальных условиях эксплуатации.

Системный анализ полученных данных для интерпретации результатов и выявления физических закономерностей.

Методологический подход был структурирован в три взаимосвязанных блока:

#### **1. Исследование спектральных характеристик материалов**

Спектры поглощения в диапазоне температур 77-400 К были зарегистрированы на спектрофотометре Shimadzu UV-3101PC с использованием азотного заливного оптического криостата LN-121-SPECTR. (ООО «Криогенные приборы»).

Спектры люминесценции керамических образцов были измерены в температурном диапазоне от 77 К до 400 К. Исследования проводились на

монохроматоре ARC SpectraPro-300i. Сигналы были зарегистрированы с помощью термоэлектрически охлаждаемого InGaAs-детектора (диапазон чувствительности: 0,4–1,7 мкм). Для диапазона 77–300 К использовался криостат LN-121-SPECTR, а для диапазона 325–400 К – самодельный нагреватель, собранный в лаборатории активных сред твердотельных лазеров ОЛК НЦЛМТ ИОФ РАН. Он представлял собой держатель образца с встроенным резистивным нагревательным элементом.

Кинетика затухания люминесценции (радиационное время жизни  $\tau_R$ ) в керамических образцах были измерены в том же температурном диапазоне (77–400 К) с использованием монохроматора МДР-12-1 и осциллографом RIGOL (DS1102). Возбуждение осуществлялось диодным лазером LDD-10, а регистрация сигнала – фотодетектором ФД10-ГА.

## 2. Исследование генерационных характеристик

Экспериментальная установка включала систему накачки и резонаторную конфигурацию, спроектированную для минимизации оптических потерь. В качестве источника накачки применялся диодный лазер с волоконным выводом излучения BWT940K (Beijing BWT Selected Co., Ltd.) с длиной волны 940 нм, максимальной выходной мощностью излучения 40 Вт и диаметром сердцевины активного волокна 105 мкм.

## 3. Численные расчеты и анализ данных

Численные расчеты и обработка данных проведены с использованием инструментов на базе языка Python.

## Достоверность результатов

Достоверность представленных в работе результатов подтверждается:

Методической обоснованностью – использованием стандартизированных методов спектроскопии, люминесцентного анализа и генерационных измерений, принятых в исследованиях лазерных материалов.

Воспроизводимостью данных – повторяемостью результатов при многократных измерениях в идентичных условиях, а также при варьировании параметров настройки экспериментальной установки.

Согласованностью с литературными данными – хорошим соответствием полученных спектральных характеристик, порогов генерации и других ключевых параметров с опубликованными результатами для аналогичных керамических систем, легированных ионами  $Yb^{3+}$  и  $Er^{3+}$ .

Калибровкой оборудования – использованием эталонных образцов и регулярным контролем метрологических характеристик измерительных приборов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована цель и задачи работы, показана научная новизна и значимость полученных результатов, перечислены защищаемые положения и кратко рассматривается содержание диссертационной работы по главам.

**В главе 1**, представлено описание особенностей кристаллической структуры и физико-химических свойств ИАГ. Рассмотрены спектрально-люминесцентные свойства редкоземельных ионов в ИАГ, а также основные методы роста монокристаллов на основе ИАГ и методы синтеза лазерных керамик ИАГ и ИСАГ.

**В главе 2** исследуемые образцы представляли собой керамики состава  $Er_xY_{3-x}Al_5O_{12}$  и  $Er_xY_{3-x}(Al,Sc)_5O_{12}$ , где степень замещения составляла  $x = 1,5$ , что соответствует 50 ат.%  $Er^{3+}$  по отношению к позиции  $Y^{3+}$  таким образом, половина иттриевых узлов в структуре граната замещена ионами  $Er^{3+}$ .

Образцы были предоставлены сотрудниками из научно-лабораторного комплекса чистых зон СКФУ под руководством Тарала В.А.

Химический состав и параметры элементарных ячеек образцов приведены в таблице 1. Состав определяли по соотношению исходных компонентов.

Таблица 1. Химический состав и параметры решётки  $Er^{3+}$ :ИАГ ( $C_1, C_2$ ) и  $Er^{3+}$ :ИСАГ ( $C_3, C_4$ ) керамики.

| Образцы | Химический состав   | Параметр решётки $a, \text{Å}$ |
|---------|---|--------------------------------|
| $C_1$   | $Er_{1,50\pm 0,03}Y_{1,50\pm 0,03}Al_{5,00\pm 0,03}O_{12}$                  | 11,99483(6)                    |
| $C_2$   | $Er_{1,50\pm 0,03}Y_{1,50\pm 0,03}Al_{5,00\pm 0,03}O_{12}$                  | 11,99920(8)                    |
| $C_3$   | $Er_{1,43\pm 0,03}Y_{1,43\pm 0,03}Sc_{0,38\pm 0,03}Al_{4,76\pm 0,03}O_{12}$ | 12,03188(7)                    |
| $C_4$   | $Er_{1,43\pm 0,03}Y_{1,43\pm 0,03}Sc_{0,38\pm 0,03}Al_{4,76\pm 0,03}O_{12}$ | 12,03136(6)                    |

Образцы были получены методом обратного соосаждения [24,25] и имели гранатную кубическую структуру (пространственная группа  $Ia\bar{3}d$ ), что подтверждено рентгенофазовым анализом [26]. Установлено, что введение ионов  $Sc^{3+}$  приводит к увеличению параметра решётки и улучшению спекания материала.

Микроструктурные исследования (СЭМ и СЭМ–ЭДС) показали, что керамика  $Er^{3+}$ :ИСАГ характеризуется более однородной, мелкозернистой и плотной структурой при отсутствии сегрегации элементов на границах зерен, в отличие от  $Er^{3+}$ :ИАГ, содержащей заметное количество пор. Равномерность распределения Er, Y, Al, Sc и O указывает на формирование гомогенного твердого раствора.

На рисунке 1 показаны изображения образцов керамики  $\text{Er}^{3+}$ :ИАГ (а и б) и  $\text{Er}^{3+}$ :ИСАГ (с и d), полученные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).

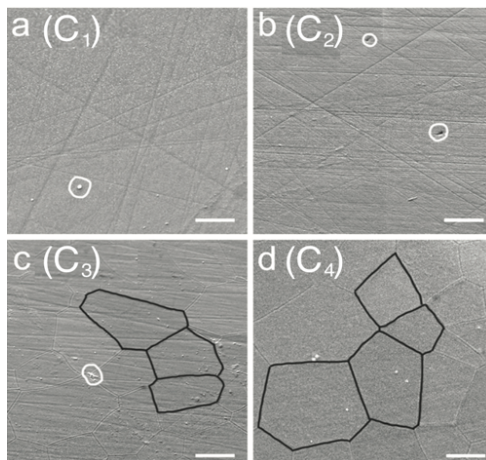


Рисунок 1 – Изображения образцов керамики  $\text{Er}^{3+}$ :ИАГ (а и б) и  $\text{Er}^{3+}$ :ИСАГ (с и d), полученные на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Масштабная линейка составляет 10 мкм. Границы некоторых соседних зерен отмечены черными линиями. Поры отмечены белыми кружками.

Измеренные показатели преломления для трёх длин волн были аппроксимированы уравнением Зельмейера [27]. Спектры пропускания керамик ИАГ и ИСАГ (рис. 2), легированных  $\text{Er}^{3+}$ , были измерены при комнатной температуре в спектральном диапазоне 250–1700 нм.

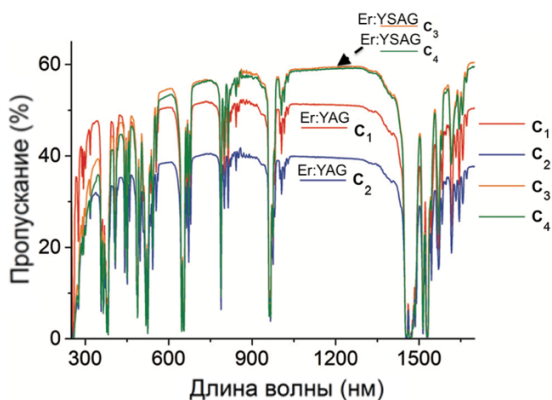


Рисунок 2 – Спектры пропускания керамики 50 ат.% Er<sup>3+</sup>:ИАГ (C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>) и 50 ат.% Er<sup>3+</sup>:ИСАГ (C<sub>3</sub> и C<sub>4</sub>).

Для керамики 50 ат.% Er<sup>3+</sup>:ИСАГ характерно более высокое пропускание. Это связано с тем, что наличие ионов Sc<sup>3+</sup> в кристаллической структуре приводит к снижению температуры плавления керамических порошков и, как следствие, уменьшению количества пор, формируя более однородную структуру [28].

**В главе 3** исследовались керамики системы Y<sub>3-x</sub>Yb<sub>x</sub>Sc<sub>y</sub>Al<sub>5-y</sub>O<sub>12</sub> со степенью легирования x = 0,25, что соответствует содержанию 8,3 ат.% Yb<sup>3+</sup> относительно Y-подрешётки гранатной структуры. В гранатах катионы Y<sup>3+</sup> и Yb<sup>3+</sup> занимают додекаэдрические (8-координированные) позиции. Таким образом, величина 8,3 ат.% означает, что 0,25 катиона Yb<sup>3+</sup> замещает соответствующую долю катионов Y<sup>3+</sup> именно в додекаэдрических позициях, общее количество которых равно трём на формульную единицу. Для всех исследованных составов выполняется стехиометрическое условие: (Y+Yb) = 3, а также Sc+Al = 5, что соответствует общей формуле граната {A<sub>3</sub>} [B<sub>2</sub>]C<sub>3</sub>O<sub>12</sub>.

Образцы были предоставлены сотрудниками из научно-лабораторного комплекса чистых зон СКФУ под руководством Тарала В.А. Составы, параметры решетки и толщины образцов керамики представлены в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав, кристаллохимический состав граната, параметр решетки и толщина оптической керамики Yb:ИСАГ.

| №  | Химический состав  | Кристаллохимический состав граната {A <sub>3</sub> } [B <sub>2</sub> ]C <sub>3</sub> O <sub>12</sub>                               | Параметр решетки a <sub>sv</sub> , Å | Толщина, см |
|----|--|--|--------------------------------------|-------------|
| S1 | Y <sub>1,95</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,00</sub> O <sub>12</sub> | {Y <sub>1,95</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>0,80</sub> } [Al <sub>1,80</sub> Sc <sub>0,20</sub> ]Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | 11,954(6)                            | 0,0945      |
| S2 | Y <sub>2,15</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,60</sub> O <sub>12</sub> | {Y <sub>2,15</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>0,60</sub> } [Al <sub>1,60</sub> Sc <sub>0,40</sub> ]Al <sub>3</sub> O <sub>12</sub> | 12,009(6)                            | 0,0985      |

|    |   |  |           |        |
|----|---|--|-----------|--------|
| S3 | $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$ | $\{Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{0,40}\}[Al_{1,40}Sc_{0,60}]Al_3O_{12}$ | 12,063(6) | 0,0985 |
| S4 | $Y_{2,55}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,20}O_{12}$ | $\{Y_{2,55}Yb_{0,25}Sc_{0,20}\}[Al_{1,20}Sc_{0,80}]Al_3O_{12}$ | 12,117(6) | 0,0945 |
| S5 | $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$ | $\{Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,23}\}[Al_{1,85}Sc_{0,15}]Al_3O_{12}$ | 12,008(6) | 0,0965 |

Образцы были синтезированы модифицированным методом обратного соосаждения [24,25]. Ключевой особенностью использованной технологии является целенаправленное создание твёрдых растворов с контролируемым распределением ионов  $Sc^{3+}$  между додекаэдрическими {A} и октаэдрическими [B] позициями структуры граната, что позволило исследовать пять составов (S1-S5) с различным кристаллохимическим составом.

Проведен анализ оптических свойств. Установлено, что все образцы демонстрируют пропускание свыше 80% в широком спектральном диапазоне (рис. 3). Природа полос поглощения в прозрачных керамиках Yb:ИСАГ с содержанием ионов иттербия 8,3 ат.% в коротковолновой области спектра (300-500 нм) обусловлена частичным восстановлением катионов  $Yb^{3+}$  до  $Yb^{2+}$  [29] и присутствием вакансий кислорода [30], концентрации которых могут быть снижены после отжига на воздухе [31,32].

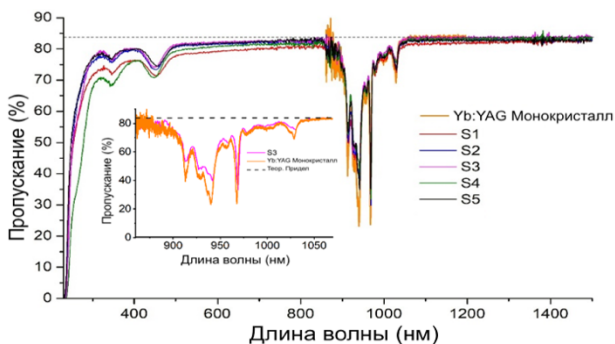


Рисунок 3 – Спектры пропускания монокристалла 1 ат.% Yb:ИАГ (Экситон, Ставрополь, Россия) и прозрачной керамики Yb:ИСАГ, где S1, S2, S3, S4 и S5 соответствуют составам  $Y_{1,95}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,80}O_{12}$ ,  $Y_{2,15}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,60}O_{12}$ ,  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$ ,  $Y_{2,55}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,20}O_{12}$  и  $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$ . Вставка – Спектры пропускания монокристалла Yb:ИАГ с концентрацией 1 ат.% и прозрачной керамики  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  (S3).

Для анализа влияния содержания и распределения ионов  $Sc^{3+}$  на спектральные характеристики были выбраны два образца керамики Yb:ИСАГ с различной концентрацией скандия, а также монокристалл 1 ат.% Yb:ИАГ, использованный в качестве эталонного материала. На рисунке 4 представлены спектры люминесценции

при 77 К для монокристалла 1 ат.% Yb:ИАГ и керамик состава  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  (S3) и  $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$  (S5).

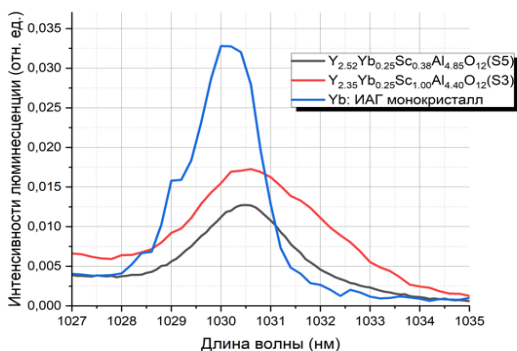


Рисунок 4 – Спектры люминесценции при 77 К для керамик состава  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  (S3) и  $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$  (S5), а также монокристалла, 1 ат.% Yb:ИАГ.

Максимум излучения для всех образцов расположен в области 1030 нм. Для керамик S3 и S5 при 77 К наблюдается небольшое смещение (около 0,4 нм) в длинноволновую область по сравнению с монокристаллом Yb:ИАГ. Этот сдвиг обусловлен изоморфными замещениями  $Sc^{3+} \rightarrow Al^{3+}$  и  $Y^{3+} \rightarrow Sc^{3+}$ , вызывающими локальное изменение кристаллического поля и, как следствие, изменение энергетических разностей между штарковскими подуровнями мультиплетов  $^2F_{5/2}$  и  $^2F_{7/2}$  [23].

Температурные изменения положения спектральных линий для керамик с различным распределением ионов  $Sc^{3+}$  по позициям решётки ( $Y^{3+}$  и  $Al^{3+}$ ) незначительны, а основное различие в спектральных характеристиках проявляется при сравнении с монокристаллом Yb:ИАГ.

Исследована кинетика затухания люминесценции уровня  $^2F_{5/2}$  ионов  $Yb^{3+}$  в диапазоне температур 77–400 К. Основным фактором, определяющим наблюдаемую температурную зависимость радиационного времени жизни люминесценции  $Yb^{3+}$ , является температурно-зависимая миграция энергии возбуждения по ионам  $Yb^{3+}$ .

Как показано в работе Басиева и Щербакова [33], время жизни уменьшается тогда, когда миграция возбуждения протекает эффективно, поскольку в этом случае возрастает вероятность переноса энергии к центрам тушения. Напротив, замедление миграции приводит к уменьшению вероятности безызлучательной дезактивации и, соответственно, к увеличению наблюдаемого времени жизни.

При температурах около 77 К миграция электронного возбуждения протекает наиболее эффективно, поскольку однородная ширина линии становится сравнимой с неоднородной, обеспечивая оптимальное перекрытие резонансных переходов  $\text{Yb}^{3+}$ . В этом режиме возбуждение быстро перемещается между ионами и достигает центров тушения, что приводит к уменьшению измеряемого времени жизни. При дальнейшем повышении температуры миграция замедляется.

Такое поведение полностью согласуется с выводом авторов: «Уменьшение тушения (рост  $\tau$ ) при уменьшении температуры и при её возрастании обусловлено замедлением миграции возбуждения по ионам  $\text{Yb}^{3+}$ ».

На рисунке 5 представлена температурная зависимость времени жизни люминесценции  $\tau_R$  уровня  ${}^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  для образца керамики  $\text{Y}_{2,52}\text{Yb}_{0,25}\text{Sc}_{0,38}\text{Al}_{4,85}\text{O}_{12}$  в диапазоне от 77 К до 400 К.

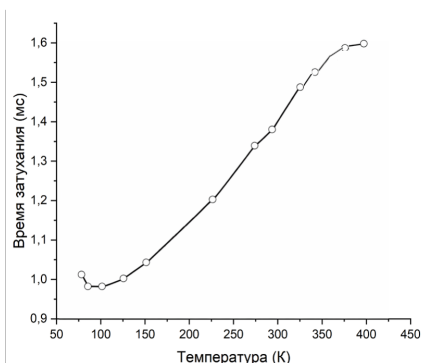


Рисунок 5 – Температурная зависимость времени затухания люминесценции  $\text{Y}_{2,52}\text{Yb}_{0,25}\text{Sc}_{0,38}\text{Al}_{4,85}\text{O}_{12}$  в диапазоне температур 77–400К.

Для изучения генерационных характеристик исследуемые образцы помещались в оптический резонатор лазера в качестве активного элемента. Проведена оптимизация резонатора и параметров накачки для достижения режима генерации близкого к  $\text{TEM}_{00}$ . Лазерные характеристики исследованы в квазинепрерывном и непрерывном режимах генерации. Схема резонатора лазера и системы накачки приведена на рисунке 6.

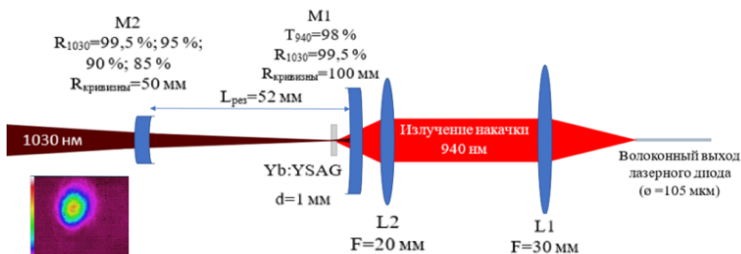


Рисунок 6 – Экспериментальная схема резонатора лазера. L1, L2 – собирающие линзы; M1, M2 – сферические зеркала.

В таблице 3 представлено сравнение лазерных характеристик образцов исследуемой оптической керамики и монокристалла Yb:ИАГ. Данное сравнение проводится для случаев, когда в резонаторе в качестве выходного зеркала использовалось зеркало с коэффициентом пропускания 15% на длине волны генерации, поскольку именно для этого зеркала были получены наибольшие средние мощности и эффективность генерации. Максимальная поглощённая мощность накачки для всех образцов керамики S1-S5 составляла 3,5 Вт, тогда как для монокристалла Yb:ИАГ она была равна 10,5 Вт.

Таблица 3. Сравнение энергетических характеристик образцов керамики разного состава и монокристалла Yb:ИАГ.

| Керамика   | Индекс образца | P <sub>max</sub> , Вт | Дифф. КПД, % | Опт. КПД, % |
|--|----------------|-----------------------|--------------|-------------|
| Y <sub>1,95</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,80</sub> O <sub>12</sub> | S1             | 1,64                  | 53,4         | 43,6        |
| Y <sub>2,15</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,60</sub> O <sub>12</sub> | S2             | 1,83                  | 56,4         | 48,7        |
| Y <sub>2,35</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,40</sub> O <sub>12</sub> | S3             | 2,19                  | 74,9         | 62,4        |
| Y <sub>2,55</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>1,00</sub> Al <sub>4,20</sub> O <sub>12</sub> | S4             | 1,81                  | 62           | 53          |
| Y <sub>2,52</sub> Yb <sub>0,25</sub> Sc <sub>0,38</sub> Al <sub>4,85</sub> O <sub>12</sub> | S5             | 1,55                  | 52,7         | 42,8        |
| Yb:ИАГ   | -              | 4,4                   | 74           | 40,6        |

Наилучшие результаты продемонстрировал образец S3 (Y<sub>2,35</sub>Yb<sub>0,25</sub>Sc<sub>1,00</sub>Al<sub>4,40</sub>O<sub>12</sub>), для которого в квазинепрерывном режиме достигнута выходная мощность 2,19 Вт при дифференциальном КПД 74,9%.

Методом Финдли-Клэя [34,35] оценены суммарные потери в резонаторе, основным вкладом в которые являются френелевские отражения.

Показано, что лазерная керамика Yb:ИСАГ, в особенности состав S3, по ключевым генерационным характеристикам не уступает, а по дифференциальному КПД превосходит монокристалл Yb:ИАГ.

В Главе 4 представлены результаты исследования влияния температуры на генерационные характеристики керамик Yb:ИСАГ и монокристалла Yb:ИАГ. Эксперименты проводились в резонаторе с диодной накачкой ( $\lambda = 940$  нм) в квазинепрерывном режиме. Активные элементы размещались в держателе с термостабилизацией.

Установлено, что с ростом температуры все исследуемые образцы демонстрируют снижение выходной мощности и эффективности генерации. Наибольшая выходная мощность среди керамик (2,4 Вт) достигнута для состава S3 ( $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$ ) при 325 К. Наилучший дифференциальный КПД в диапазоне высоких температур показал состав S2 ( $Y_{2,15}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,60}O_{12}$ ), продемонстрировавший стабильность характеристик ( $\eta_s=34\%$  при 325 К и 28% при 400 К).

На рисунке 7 представлены спектры лазерной генерации керамики  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  и монокристалла 1 ат.% Yb:YAG, измеренные в диапазоне температур 325–400 К.

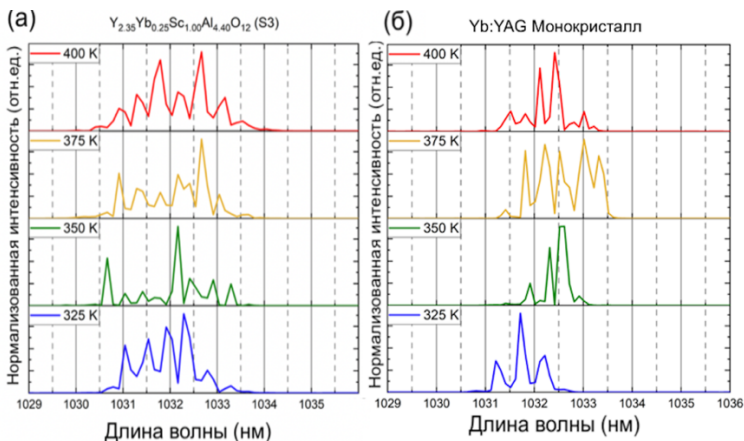


Рисунок 7 – Спектры лазерного излучения керамики  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  (а) и монокристалла 1 ат.% Yb: ИАГ (б), измеренные при поглощенной мощности накачки 8 Вт и температурах от 325 К до 400 К.

В исследованных образцах температурная зависимость спектров лазерной генерации проявляется в плавном смещении максимума излучения в длинноволновую область и одновременном изменении ширины спектральной полосы.

Максимальный пик для керамики  $Y_{2,35}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,40}O_{12}$  смещается с  $\sim 1032,0$  нм при 325 К до  $\sim 1032,5$  нм при 400 К, а для монокристалла  $Yb:YAG$  - с  $\sim 1032,0$  нм до  $\sim 1032,6$  нм.

Наряду с этим наблюдается изменение ширины спектра генерации: FWHM уменьшается при охлаждении от  $\sim 2,4$  до  $\sim 1,9$  нм для керамики и от  $\sim 1,6$  до  $\sim 1,2$  нм для монокристалла.

Исследование поляризационных характеристик показало, что выходное излучение всех керамик является линейно-поляризованным. На рисунке 8 показаны поляризационные характеристики лазерного излучения в керамике  $Y_{2,15}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,60}O_{12}$ .

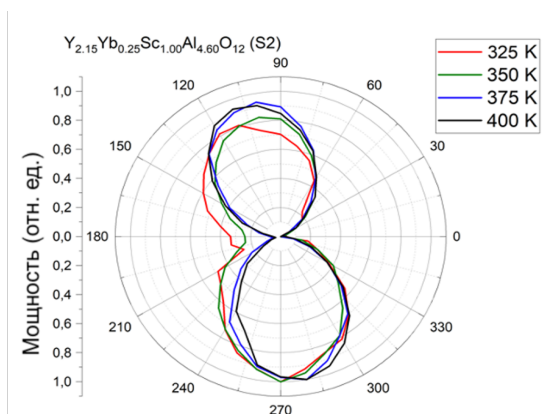


Рисунок 8 – Поляризационные характеристики лазерного излучения в керамике  $Y_{2,15}Yb_{0,25}Sc_{1,00}Al_{4,60}O_{12}$ .

Обнаружено нестандартное поведение состава S5 ( $Y_{2,52}Yb_{0,25}Sc_{0,38}Al_{4,85}O_{12}$ ), для которого в диапазоне 375–400 К происходит поворот плоскости поляризации на  $90^\circ$ , что может быть связано с перераспределением механических напряжений при нагреве. Однако точная идентификация доминирующего механизма, ответственного за  $90^\circ$ -градусный поворот поляризации в керамике S5 при 375–400 К, требует дальнейших целенаправленных исследований.

## Заключение

В данной диссертационной работе проведено комплексное исследование спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик лазерной керамики на основе скандий-содержащего граната (ИСАГ), легированной ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$ . В результате выполненных экспериментов и анализа полученных данных были достигнуты следующие ключевые результаты:

1. На основе проведённых температурных измерений кинетики затухания люминесценции (радиационного времени жизни) уровня  ${}^2F_{5/2}$  ионов  $\text{Yb}^{3+}$  в керамике  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ установлено, что наблюдается увеличение  $\tau_R$  от  $\sim 1,0$  мс при 77 К до  $\sim 1,6$  мс при 400 К. Сопоставление экспериментальных данных с литературными результатами показывает, что наблюдаемая температурная зависимость обусловлена замедлением температурно-зависимой миграции энергии возбуждения по ионам  $\text{Yb}^{3+}$ , что приводит к снижению вероятности переноса энергии к неконтролируемым центрам тушения. Такой характер поведения согласуется с известными закономерностями для кристаллов гранатов, активированных трехвалентными ионами иттербия.

2. Впервые для лазерной керамики  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ достигнут дифференциальный КПД генерации 74,9%. Это стало возможным в результате комплексной оптимизации отечественной технологии синтеза, ключевым этапом которой является применение метода обратного соосаждения для изготовления исходных нанопорошков, обеспечившего высокую химическую однородность.

3. Впервые реализована генерация стабильного линейно-поляризованного излучения (1,03 мкм) в оптически изотропной керамике  $\text{Yb}^{3+}$ :ИСАГ, что расширяет область её применения в поляризационно-чувствительных оптических устройствах. Экспериментально обнаружен и описан нетривиальный для данного класса материалов температурно-индуцированный эффект поворота плоскости поляризации на  $90^\circ$  в керамике состава  $\text{Y}_{2,52}\text{Yb}_{0,25}\text{Sc}_{0,38}\text{Al}_{4,85}\text{O}_{12}$ .

Результаты диссертационной работы имеют практическую значимость и могут быть использованы для решения широкого класса задач, связанных с разработкой новых лазерных материалов и созданием на их основе высокоэффективных твердотельных лазеров. Высокоэффективная керамика  $\text{Yb}$ :ИСАГ, обладающая конкурентоспособными генерационными характеристиками, рекомендуется к использованию в качестве активной среды в твердотельных лазерах с диодной накачкой средней и высокой мощности.

Проведенные исследования открывают ряд перспективных направлений для дальнейших научных и прикладных исследований. Особенно перспективным представляется детальное изучение влияния вариаций соотношения  $\text{Sc}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  и концентрации редкоземельных ионов на поляризационные характеристики генерации и температурную стабильность лазера.

## Список опубликованных работ

1. The influence of the  $\text{Sc}^{3+}$  dopant on the transmittance of  $(\text{Y},\text{Er})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ceramics / Dobretsova E., Zhmykhov V., Kuznetsov S., Chikulina I., Nikova M., Tarala V., Tsvetkov V. // Dalton Transactions. 2021. Vol. 50, № 40. P. 14252-14256. <https://doi.org/10.1039/D1DT02419A>
2. Оптические и лазерные характеристики  $\text{Yb}:\text{YSAF}$ -керамики / Жмыхов В.Ю., Гурьев Д.А., Цветков В.С., Добрецова Е.А., Пырклов Ю.Н., Кузнецов С.В., Никова М.С., Тарала В.А., Вакалов Д.С., Кравцов А.А., Цветков В.Б. // Оптика и спектроскопия. 2023. Т. 131, № 5. С. 597-605. <https://doi.org/10.21883/OS.2023.05.55710.68-22>
3.  $\text{Yb}:\text{YSAF}$  ceramics: An attractive thin-disk laser material alternative to a single crystal? / Zhmykhov V., Guryev D., Tsvetkov V.S., Pyrkova Y., Shvedchenko A., Dobretsova E., Kuznetsov S., Nikova M., Tarala V., Tsvetkov V.B. // Ceramics International. 2024. Vol. 50, № 23. P. 50358-50366. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.381>
4. Studying temperature dependence of lasing characteristics of  $\text{Yb}^{3+}:\text{YSAF}$  ceramics and  $\text{YAG}$  single crystals from 325 to 400 K/ Zhmykhov V., Guryev D., Tsvetkov V.S., Dobretsova E., Pyrkov Y., Kuznetsov S., Tarala V., Nikova M., Tsvetkov V.B. // Optical Materials. 2025. Vol. 164. P. 117029. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.117029>

## Цитируемая литература

1. Diode Pumped Solid State Lasers / R.L. Byer // Optics InfoBase Conference Papers. – 2009. – paper MD1\_1.
2. Лукин Е. С. / Теоретические основы получения и технология оптически прозрачной керамики. – 1980. – Москва: Энергия. – 176 с.
3. Каминский А. А. / Стимулированное излучение в монокристаллах  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  // ЖЭТФ. – 1967.
4. П. П. Феофилов, В. А. Тимофеева, М. Н. Толстой, Л. М. Беляев. // Оптика и спектроскопия, –1965. –19, –Р. 817.
5. Pulsed  $\text{Nd}:\text{YAG}$  laser beam drilling: A review / G.D. Gautam, A.K. Pandey // Optics & Laser Technology. – 2018. – Vol. 100. – P. 183–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.10.014>.
6. Stable, Single Frequency  $\text{Er}:\text{YAG}$  Lasers at  $1.6 \mu\text{m}$  / N.W.H. Chang, C.Y. Tsai, Y.F. Chen // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2010. – Vol. 46, № 7. – P. 1039–1042. DOI: <https://doi.org/10.1109/JQE.2010.2046720>.

7. Mid infrared lasers for remote sensing applications / B.M. Walsh, H.R. Lee, N.P. Barnes // *Journal of Luminescence*. – 2016. – Vol. 169, Pt. B. – P. 400–405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.08.058>.
8. Violet laser diode enables lighting communication / Y.-C. Chi, D.-H. Hsieh, C.-Y. Lin [et al.] // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – P. 10469. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11126-y>.
9. Dynamics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles accelerated in the field of a submillisecond pulse from an Er:YAG laser / A.V. Belikov // *Technical Physics*. – 2005. – Vol. 50, № 5. – P. 666–668. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1929445>.
10. Ando, M. Stable operation of a 300-m laser interferometer with sufficient sensitivity to detect gravitational-wave events within our galaxy / M. Ando, S. Kawamura, S. Sakata [et al.] // *Physical Review Letters*. – 2001. – Vol. 86, № 18. – P. 3950–3953. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3950>.
11. De Vido, M. Characterisation of adhesive-free bonded crystalline Yb:YAG for high energy laser applications / M. De Vido, P.D. Mason, J.M. Smith, K. Ertel, S. Banerjee // *Optical Materials Express*. – 2017. – Vol. 7, № 2. – P. 425–432. DOI: <https://doi.org/10.1364/OME.7.000425>.
12. Kunkel, N. Recent advances in rare earth doped inorganic crystalline materials for quantum information processing / N. Kunkel, P. Goldner // *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*. – 2018. – Vol. 644, № 2. – P. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.1002/zaac.201700342>.
13. Böttger, T. Optical spectroscopy and decoherence studies of Yb<sup>3+</sup>:YAG at 968 nm / T. Böttger, C.W. Thiel, Y. Sun, R.M. Macfarlane, R.L. Cone // *Physical Review B*. – 2016. – Vol. 94, № 4. – P. 045134. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.045134>.
14. Stimulated Raman adiabatic passage in Tm<sup>3+</sup>:YAG / A.L. Alexander, J.J. Longdell, M.J. Sellars, N.B. Manson // *Physical Review B*. – 2008. – Vol. 78, № 14. – P. 144407. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.78.144407>.
15. Mah, T. I., Parthasarathy, T. A. // Effects of temperature, environment, and orientation on the fracture toughness of single-crystal YAG. / *Journal of the American Ceramic Society*. – 1997. – Vol. 80. – P. 2730–2734. DOI: [10.1111/j.1151-2916.1997.tb03185.x](https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1997.tb03185.x).
16. Coble, R.L. Transparent alumina and method of preparation: пат. 3026210 США / R.L. Coble; заявл. 03.01.1959; опубли. 20.03.1962.
17. Frantz, J. *Materials* 2012 / J. Frantz, B. Sadowski, I. Aggarwal // *Materials*. – 2012. – Vol. 5, № 2. – P. 258–277. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma5020258>.
18. Ikesue, A. Fabrication and Optical Properties of High-Performance Polycrystalline Nd:YAG Ceramics for Solid-State Lasers / A. Ikesue, I. Furusato, K. Kamata // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1995. – Vol. 78, № 4. – P. 1033–1040. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb08477.x>.

19. Comparison of crystalline and ceramic composite Nd:YAG for high power diode end-pumping / D. Kracht, R. Wilhelm, M. Frede // *Optics Express*. – 2005. – Vol. 13, № 16. – P. 6212–6219. DOI: <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.006212>.
20. Laser Applications of Transparent Polycrystalline Ceramic / Q. Lou, J. Zhou, Y. Qi, H. Cai // *Advances in Ceramics - Synthesis and Characterization, Processing and Specific Applications* / ed. by Costas Sikalidis. – Rijeka: InTech, 2011. – P. 471–494. – ISBN 978-953-307-505-1.
21. Lutts G. B., Denisov A. L., Zharikov E. V., Zagumennyi A. / GSAG and YSAG: a study on isomorphism and crystal growth // *Optical and Quantum Electronics*. – 1990. – Vol. 22. – P. S269–S281. DOI: 10.1007/BF02089015.
22. Denisov A. L., Zharikov E. V., Zagumennyi A. I., Kalitin S. P., Smirnov V. A., Talybov A. I., Shcherbakov I. A. / Gadolinium scandium aluminum and yttrium scandium aluminum garnet crystals as active media for solid state lasers in the 1.5  $\mu\text{m}$  region // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 1988. – Vol. 49. – P. 932–935. DOI: 10.1007/BF00662785.
23. Zharikov, E.V. Rare-earth scandium garnets as an object of crystallization / E.V. Zharikov // *Crystal Research and Technology*. – 1989. – Vol. 24, № 8. – P. 745–750.
24. Nd:YAG Near-Infrared Luminescent Nanothermometers / A. Benayas, D. Jaque, F. Vetrone, K. Yanagisawa // *Advanced Optical Materials*. – 2015. – Vol. 3, № 5. – P. 687–694. DOI: <https://doi.org/10.1002/adom.201400547>.
25. Rare-earth-doped  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  (YAG) nanophosphors: synthesis, surface functionalization, and applications in thermoluminescence dosimetry and nanomedicine / A. Jain, P. Sengar, G.A. Hirata // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2018. – Vol. 51, № 30. – P. 303002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aacbl1a>.
26. The influence of the  $\text{Sc}^{3+}$  dopant on the transmittance of  $(\text{Y},\text{Er})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  ceramics / Dobretsova E., Zhmykhov V., Kuznetsov S., Chikulina I., Nikova M., Tarala V., Tsvetkov V. // *Dalton Transactions*. 2021. Vol. 50, № 40. P. 14252-14256. <https://doi.org/10.1039/D1DT02419A>.
27. Sellmeier, W. Ueber die durch die Aetherschwingun generregten Mitschwingungen der Körpertheilchen und deren Rück wirkung auf die ersteren, besonderszur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien (II. Theil) / W. Sellmeier // *Annalen der Physik und Chemie*. – 1872. – Vol. 223. – No. 11. – P. 386–403. DOI:10.1002/andp.18722231105.
28. Nikova, M.S. The scandium impact on the sintering of YSAG:Yb ceramics with high optical transmittance / M.S. Nikova, V.A. Tarala, F.F. Malyavin, D.S. Vakalov, V.A. Lapin, D.S. Kuleshov, A.A. Kravtsov, I.S. Chikulina, L.V. Tarala, E.A. Evtushenko, E.V. Medyanik, S.O. Krandievsky, A.V. Bogach, S.V. Kuznetsov //

- Ceramics International. – 2022. – Vol. 47, № 2. – P. 1772-1784. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.003>.
29. Chen, X. Effect of MgO doping on the structure and properties of YAG transparent ceramics / X. Chen, Y. Wu, N. Wei, J. Qi, Z. Li, Q. Zhang, T. Huang, Q. Zhang, T. Li // Journal of the European Ceramic Society. – 2018. – Vol. 38, № 5. – P. 1957–1965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.11.041>.
30. Lu, Z. Fabrication and optical properties of Nd:YAG transparent ceramics with tetraethyl orthosilicate as sintering aid / Z. Lu, T. Lu, N. Wei, W. Zhang, B. Ma, J. Qi, Y. Guan, X. Chen, H. Wu, Y. Zhao // Optical Materials. – 2015. – Vol. 47. – P. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.05.025>.
31. Jiang, N. Effect of air annealing on the optical properties and laser performance of Yb:YAG transparent ceramics / N. Jiang, C. Ouyang, Y. Liu, W. Li, Y. Fu, T. Xie, Q. Liu // Optical Materials. – 2019. – Vol. 95. – P. 109203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109203>.
32. Kushida, T. Interference analogy of Raman-luminescence problem and experimental discrimination by polarization correlation / T. Kushida, E. Takushi, V. Oka // Journal of Luminescence. – 1976. – Vol. 12-13. – P. 723–727. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-2313\(76\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0022-2313(76)90066-7).
33. Басиев, Т.Т. Миграция энергии по ионам Yb<sup>3+</sup> в кристаллах гранатов / Т.Т. Басиев, Ю.К. Воронько, Т.Г. Мамедов, И.А. Щербakov // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2, № 10. – С. 2172–2182.
34. Findlay, D. The measurement of internal losses in laser oscillators / D. Findlay, R.A. Clay // Physics Letters. – 1966. – Vol. 20. – P. 277–278. DOI: [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(66\)90363-5](https://doi.org/10.1016/0031-9163(66)90363-5).
35. Mat Daud, Y. Optical and lasing properties of Er:YAG ceramics / Y. Mat Daud, A.R. Tamuri, N. Bidin // Jurnal Fizik UTM. – 2008. – Vol. 3. – P. 38–42.