

# Кристалл $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$ для лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм

К.Н. Горбаченя<sup>1</sup>, А.С. Ясюкевич<sup>1</sup>, В.Э. Кисель<sup>1</sup>, Н.А. Толстик<sup>2</sup>, А.А. Тараченко<sup>1</sup>,  
В.И. Гоман<sup>1</sup>, Л.К. Павловский<sup>1</sup>, В.А. Орлович<sup>3</sup>, Е.А. Волкова<sup>4</sup>, В.О. Япаскурт<sup>4</sup>,  
Н.В. Кулешов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИЦ оптических материалов и технологий,  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

<sup>2</sup>Норвежский университет науки и технологий,  
Хогсколеринген N-7491, г. Трондхейм, Норвегия

<sup>3</sup>Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,  
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь

<sup>4</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Ленинские горы, ГСП-1, г. Москва 119234, Россия

Поступила 04.02.2022

Принята к печати 23.03.2022

Твердотельные эрбиевые лазеры, излучающие в спектральной области 1,5–1,6 мкм, представляют большой интерес для различных практических применений. Из доступных на сегодня лазерных материалов для получения стимулированного излучения в области 1,5 мкм наибольшее распространение получили фосфатные стёкла, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$ . Однако максимальные выходные мощности таких лазеров ограничены несколькими сотнями милливатт из-за низких термических характеристик стекла, поэтому поиск подходящей кристаллической матрицы для ионов эрбия является актуальным и в настоящее время.

В работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристалла иттрий-гадолиниевого силиката, легированного ионами эрбия и иттербия –  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  (YGSO). Измерены спектры поглощения и люминесценции в поляризованном свете, определены времена жизни возбуждённых состояний активных ионов. Измерения спектров поглощения из возбуждённого состояния показали, что полоса поглощения из возбуждённого состояния не перекрывается с полосой усиления в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Выполнен расчёт спектров поперечных сечений вынужденного излучения и усиления.

**Ключевые слова:** эрбий, иттербий, иттрий-гадолиниевый силикат, спектроскопические свойства.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

---

**Адрес для переписки:**

Горбаченя К.Н.  
Центр оптических материалов и технологий,  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь  
e-mail: gorby@bntu.by

**Address for correspondence:**

Gorbachenya K.N.  
Center for Optical Materials and Technologies,  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: gorby@bntu.by

**Для цитирования:**

К.Н. Горбаченя, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.А. Толстик,  
А.А. Тараченко, В.И. Гоман, Л.К. Павловский, В.А. Орлович,  
Е.А. Волкова, В.О. Япаскурт, Н.В. Кулешов.  
Кристалл  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  для лазеров спектрального  
диапазона 1,5–1,6 мкм.  
Приборы и методы измерений.  
2022. – Т. 13, № 1. – С. 17–26.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

**For citation:**

K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, N.A. Tolstik, V.E. Kisel,  
A.A. Tarachenko, V.I. Homan, L.K. Pavlovskiy, V.A. Orlovich,  
E.A. Volkova, V.O. Yapaskurt, N.V. Kuleshov.  
[ $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  Crystal as Gain Media for Lasers Emitting  
in the Spectral Range of 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ ].  
Devices and Methods of Measurements.  
2022, vol. 13, no. 1, pp. 17–26 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

# $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$ Crystal as Gain Media for Lasers Emitting in the Spectral Range of 1.5–1.6 $\mu\text{m}$

K.N. Gorbachenya<sup>1</sup>, A.S. Yasukevich<sup>1</sup>, N.A. Tolstik<sup>2</sup>, V.E. Kisel<sup>1</sup>, A.A. Tarachenko<sup>1</sup>,  
V.I. Homan<sup>1</sup>, L.K. Pavlovskiy<sup>1</sup>, V.A. Orlovich<sup>3</sup>, E.A. Volkova<sup>4</sup>, V.O. Yapaskurt<sup>4</sup>, N.V. Kuleshov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Optical Materials and Technologies,  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

<sup>2</sup>Norwegian University of Science and Technology,  
Hogskoleringen 5, N-7491, Trondheim, Norway

<sup>3</sup>B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus

<sup>4</sup>Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie Gory, GSP-1, Moscow 119234, Russia

Received 04.02.2022

Accepted for publication 23.03.2022

## Abstract

Solid-state erbium lasers, emitting in the spectral range of 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ , are of great interest for several industrial applications. Nowadays the Er:glass is the most widespread laser material for obtaining laser radiation at the wavelength near 1.5  $\mu\text{m}$ . However, the maximal output powers of such lasers are restricted by hundreds of milliwatts because low thermal characteristics of the glass host. By this reason the search for new crystalline hosts doped with erbium ions is the actual task.

In this article the investigation results of spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  (YGSO) crystals are reported. Polarized absorption and luminescence spectra were measured. The lifetimes of energy levels were determined. The excited state absorption spectra were measured. It was shown that excited state absorption band does not overlap with gain band in the range 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ . The energy transfer efficiency from ytterbium to erbium ions was estimated. The stimulated emission and gain cross-section spectra for  $\text{Er}^{3+}$  ions in YGSO were calculated.

**Keywords:** erbium, ytterbium, yttrium-gadolinium silicate crystal, spectroscopic properties.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

---

### Адрес для переписки:

Горбаченя К.Н.  
Центр оптических материалов и технологий,  
Белорусский национальный технический университет,  
пр-т Независимости, 65, Минск 220013, Беларусь  
e-mail: gorby@bntu.by

### Address for correspondence:

Gorbachenya K.N.  
Center for Optical Materials and Technologies,  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus  
e-mail: gorby@bntu.by

### Для цитирования:

К.Н. Горбаченя, А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель, Н.А. Толстик,  
А.А. Тараченко, В.И. Гоман, Л.К. Павловский, В.А. Орлович,  
Е.А. Волкова, В.О. Япаскурт, Н.В. Кулешов.  
Кристалл  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  для лазеров спектрального  
диапазона 1,5–1,6 мкм.  
Приборы и методы измерений.  
2022. – Т. 13, № 1. – С. 17–26.  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

### For citation:

K.N. Gorbachenya, A.S. Yasukevich, N.A. Tolstik, V.E. Kisel,  
A.A. Tarachenko, V.I. Homan, L.K. Pavlovskiy, V.A. Orlovich,  
E.A. Volkova, V.O. Yapaskurt, N.V. Kuleshov.  
[ $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5$  Crystal as Gain Media for Lasers Emitting  
in the Spectral Range of 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ ].  
*Devices and Methods of Measurements*.  
2022, vol. 13, no. 1, pp. 17–26 (in Russian).  
**DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-1-17-26

## Введение

Твердотельные эрбиевые лазеры, излучающие в спектральной области 1,5–1,6 мкм, представляют большой интерес для различных практических применений [1]. Из доступных на сегодня лазерных материалов для получения стимулированного излучения в области 1,5 мкм наибольшее распространение получили фосфатные стёкла, легированные ионами  $\text{Er}^{3+}$ . Спектроскопические свойства эрбиевых стёкол, такие как малое время жизни энергетического уровня  $^4\text{I}_{11/2}$ , минимизирующее процессы поглощения из возбуждённого состояния и ап-конверсии, и высокий квантовый выход люминесценции в области 1,5 мкм, делают их очень эффективной лазерной средой. Кроме того, преимуществами лазеров на эрбиевых стёклах является их простота, надёжность эксплуатации и относительно низкая себестоимость. Однако максимальные средние выходные мощности таких лазеров ограничены несколькими сотнями милливатт из-за низких термических характеристик стекла, поэтому поиск подходящей кристаллической матрицы для ионов эрбия является актуальным и в настоящее время [2].

Лазерная генерация на ионах  $\text{Er}^{3+}$  с диодной накачкой была реализована в таких кристаллических матрицах как  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ ,  $\text{Lu}_2\text{SiO}_7$ ,  $\text{YVO}_4$ , однако достигнутые выходные характеристики были достаточно низкими [3–6]. Хорошо себя зарекомендовали кристаллы оксоборатов, легированные ионами эрбия и иттербия [7–11]. При использовании кристалла  $\text{Er, Yb:GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$  несколько лет назад была получена генерация в непрерывном режиме генерации с максимальной выходной мощностью до 1 Вт на длине волны 1550 нм при дифференциальной эффективности по поглощённой мощности накачки 30 % [12]. В режиме пассивной модуляции добротности продемонстрирован высокочастотный импульсный режим генерации при использовании различных насыщающихся поглотителей [13–15].

Кристаллы иттриевого и гадолиниевого силикатов  $\text{Y}_2\text{SiO}_5(\text{YSO})$  и  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5(\text{GSO})$ , легированные ионами эрбия и иттербия, известны в литературе как перспективные лазерные среды [16–18]. Интересным также представляется исследование кристаллов смешанного иттрий-

гадолиниевого силиката  $\text{YGdSiO}_5(\text{YGSO})$ , в котором сильное штарковское расщепление уровней, характерное для кристалла гадолиниевого силиката, сочетается с более изотропной структурой иттриевого силиката, при этом, в отличие от кристаллов GSO, не происходит двойникование при росте кристаллов, что значительно облегчает выращивание больших кристаллов высокого оптического качества [19].

В данной работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристаллов иттрий-гадолиниевого силиката, легированного ионами эрбия и иттербия –  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YGdSiO}_5(\text{YGSO})$ .

## Объекты и методики исследования

Кристалл  $\text{Er, Yb:YGSO}$  является двусосным анизотропным кристаллом и принадлежит к моноклинной сингонии C2/c с параметрами элементарной ячейки  $a = 1,2547$  нм,  $b = 0,6750$  нм,  $c = 1,0477$  нм,  $\beta = 102,7933^\circ$  [19]. Элементный состав монокристалла изучался с помощью энергодисперсионного спектрометра  $X\text{-Max}^n\text{-50}$  (*Oxford Instruments Ltd., GB*), установленного на базе растрового электронного микроскопа  $\text{JSM-IT500}$  (*Jeol Ltd., Japan*) с вольфрамовым термоэмиссионным катодом<sup>1</sup>. По результатам определено, что массовое содержание ионов  $\text{Er}^{3+}$  и  $\text{Yb}^{3+}$  в кристалле составило 0,3 мас.% и 3,5 мас.%, соответственно. Внешний вид выращенного кристалла  $\text{Er, Yb:YGSO}$  приведён на рисунке 1.

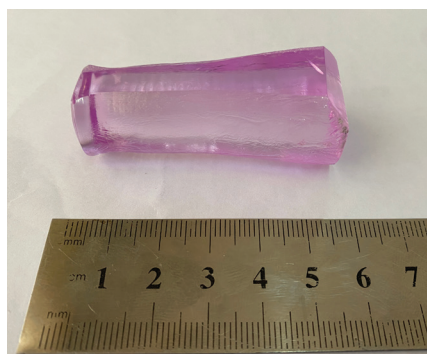


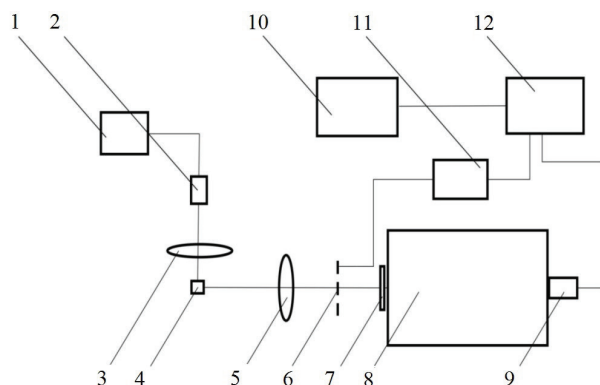
Рисунок 1 – Кристалл  $\text{Er, Yb:YGSO}$

Figure 1 – The  $\text{Er, Yb:YGSO}$  crystal

<sup>1</sup> Измерения проводились в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова на оборудовании, приобретенном в рамках «Программы развития МГУ».

Для исследования спектроскопических свойств кристаллов использовались плоскопараллельные пластинки толщиной  $2,0 \pm 0,1$  мм, ориентированные вдоль осей кристалла  $a$ ,  $b$ ,  $c$ . Измерение абсорбционных свойств производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре *Varian CARY 5000* в двух спектральных областях: 850–1050 нм, соответствующей энергетическим переходам  ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$  ионов иттербия и  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  ионов эрбия, и 1400–1650 нм, соответствующей энергетическому переходу  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  ионов эрбия. Для записи спектров в поляризованном свете в оба канала спектрофотометра помещались поляризационные призмы Глана–Тейлора. Спектральное разрешение прибора составляло 0,5 нм.

Измерение спектров люминесценции кристаллов Er, Yb:YGSO проводилось по методу синхронного детектирования при использовании экспериментальной установки, схема которой приведена на рисунке 2.



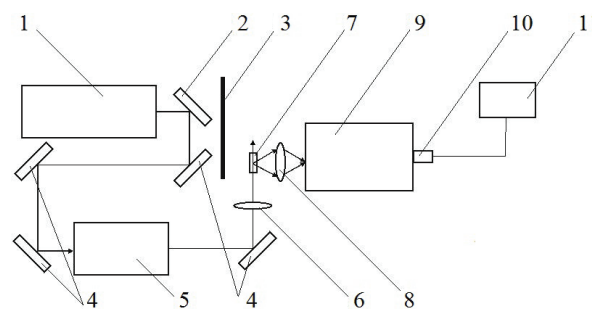
**Рисунок 2** – Схема экспериментальной установки для исследования стационарных спектров люминесценции: 1 – блок управления лазерным диодом; 2 – лазерный диод с волоконным выводом; 3, 5 – объективы; 4 – исследуемый образец; 6 – модулятор; 7 – поляризатор; 8 – монохроматор; 9 – фотоприёмник; 10 – компьютер; 11 – блок управления модулятором; 12 – синхронный усилитель

**Figure 2** – The setup for measurements of luminescence spectra: 1 – laser diode driver; 2 – fiber coupled laser diode; 3, 5 – lenses; 4 – sample; 6 – chopper; 7 – polarizer; 8 – monochromator; 9 – photodetector; 10 – computer; 11 – modulator driver; 12 – lock-in-amplifier

В качестве источника возбуждения люминесценции использовался InGaAs полупроводниковый лазерный диод 2 с волоконным выводом. Электрическое питание и стабилизация

спектрального положения полосы излучения лазерного диода осуществлялись блоком управления лазерным диодом 1. Излучение лазерного диода фокусировалось объективом 3 на исследуемый образец 4. Излучение люминесценции собиралось широкоапертурным объективом 5 на входной щели монохроматора 8. Для записи спектров люминесценции в поляризованном свете перед входной щелью монохроматора помещался тонкоплёночный поляризатор 7. Сигнал с фотоприёмника 9 обрабатывался синхронным усилителем 12, на который также подавался сигнал от модулятора 6. Выходной сигнал с усилителя 12 оцифровывался с помощью аналого-цифрового преобразователя и сохранялся компьютером 10. Регистрация спектров люминесценции выполнялась при комнатной температуре.

Для измерения кинетики затухания люминесценции возбуждённых состояний ионов-активаторов использовалась лабораторная установка, принципиальная схема которой представлена на рисунке 3.



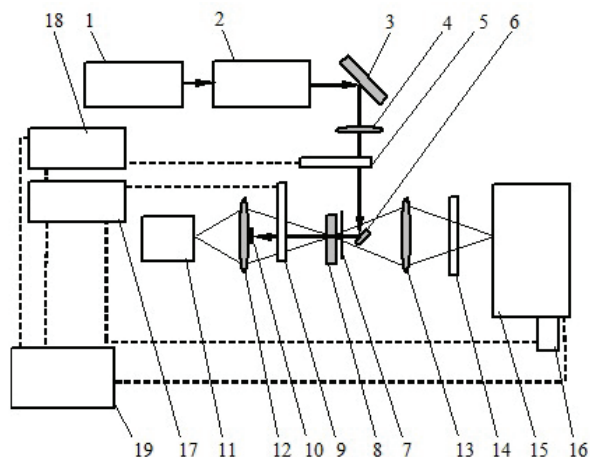
**Рисунок 3** – Схема экспериментальной установки для исследования кинетики люминесценции возбуждённых состояний ионов-активаторов: 1 – лазер на кристалле Nd:YAG; 2 – зеркало сепарирующее; 3 – экран; 4 – набор поворотных зеркал; 5 – параметрический генератор света; 6, 8 – объективы; 7 – исследуемый образец; 9 – монохроматор; 10 – фотоприёмник; 11 – осциллограф цифровой

**Figure 3** – The setup for investigation of luminescence kinetics: 1 – Nd :YAG laser; 2 – dichroic mirror; 3 – shield; 4 – set of mirrors; 5 – optical parametric oscillator; 6, 8 – lenses; 7 – sample; 9 – monochromator; 10 – photodetector; 11 – oscilloscope

Излучение третьей гармоники импульсного Nd:YAG лазера 1 при помощи сепарирующего зеркала 2 с высоким коэффициентом отражения на длине волны 355 нм и высоким коэффициентом

пропускания на длине волны 1064 нм и набора поворотных зеркал 4 с высоким коэффициентом отражения на длине волны 355 нм заводилось в параметрический генератор света 5, который использовался в качестве источника возбуждения люминесценции. Экран 3 использовался для препятствия распространению излучения с длиной волны 1064 нм. Лазерное излучение параметрического генератора света с помощью поворотного зеркала 4 фокусировалось объективом 6 в исследуемый образец 7. Излучение люминесценции собиралось объективом 8 с поверхности исследуемого образца и фокусировалось на входную щель монохроматора 9. Регистрация сигнала люминесценции выполнялась фотоприёмником 10 и цифровым осциллографом. Данные собирались и усреднялись по 512 кинетикам. Для каждого исследуемого образца проводилась серия из трёх измерений.

Измерение спектров поглощения из возбуждённого состояния осуществлялось с помощью лабораторной установки, схема которой приведена на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Схема экспериментальной установки для измерения спектров поглощения из возбуждённого состояния: 1 – Nd:YAG лазер; 2 – лазер на сапфире с титаном; 3, 6 – поворотные зеркала; 4, 12, 13 – линзы; 5, 9 – модуляторы; 7 – диафрагма; 8 – исследуемый образец; 10 – экран; 11 – галогенная лампа; 14 – поляризатор; 15 – монохроматор; 16 – фотоприёмник; 17, 18 – синхронные усилители; 19 – компьютер

**Figure 4** – The setup for measurement of excited state absorption spectra: 1 – Nd:YAG laser; 2 – Ti:sapphire laser; 3, 6 – mirrors; 4, 12, 13 – lenses; 5, 9 – choppers; 7 – diaphragm; 8 – sample; 10 – shield; 11 – halogen lamp; 14 – polarizer; 15 – monochromator; 16 – photodetector; 17, 18 – lock-in-amplifiers; 19 – computer

Принцип работы установки основан на методике возбуждения-зондирования, когда интенсивный возбуждающий пучок переводит активные ионы исследуемого образца в возбуждённое состояние, а зондирующий пучок малой интенсивности позволяет зарегистрировать изменения коэффициента поглощения этого образца. Возбуждающее излучение генерировалось титан-сапфировым лазером 2, накачиваемым излучением второй гармоники непрерывного Nd:YAG лазера. Промодулированное модулятором 5, излучение возбуждения с помощью поворотных зеркал 3 и 6 и линзы 4 фокусировалось внутри исследуемого образца 8, а непоглотившие его остатки «обрезались» экраном 10. Зондирующее излучение генерировалось галогенной лампой 11, обеспечивающей большую расходимость светового пучка. С помощью объектива 12 пучок излучения галогенной лампы собирался на поверхности исследуемого образца. Точечная диафрагма 7, установленная в непосредственной близости от образца, обеспечивала перекрытие возбуждающего и зондирующего пучков. Прошедшее исследуемый образец зондирующее излучение, собиралось объективом 13 на входной щели монохроматора 15, предварительно пройдя через поляризатор 14. За выходной щелью монохроматора был установлен InGaAs фотоприёмник 16, электрический сигнал с которого обрабатывался и усиливался синхронными усилителями 17 и 18, после чего фиксировался компьютером 19. Синхронный усилитель 17 использовал в качестве опорной частоту модулятора 9 и измерял непосредственно интенсивность ( $I$ ) прошедшего через образец 8 излучения галогенной лампы 11. Синхронный усилитель 18 использовал сигнал усилителя 17 в качестве входного сигнала и частоту модулятора 5 в качестве опорной. Он измерял дифференциальную интенсивность зондирующего излучения, прошедшего через образец, в возбуждённом и невозбуждённом случаях ( $\Delta I$ ). Компьютер 19 производил оцифровку сигналов, деление их друг на друга, сохранение и визуализацию результатов измерений, а также осуществлял управление монохроматором 15.

Значение электрического сигнала, измеряемого установленным в компьютер АЦП, определялось формулой (1):

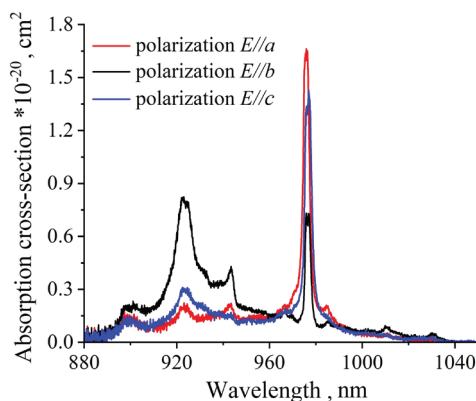
$$\frac{\Delta I}{I} = n_e L A (\sigma_{\text{ПОС}} + \sigma_{\text{ВИ}} - \sigma_{\text{ПВС}}), \quad (1)$$

где  $n_e$  – населённость возбуждённого уровня;  $L$  – толщина образца;  $A$  – коэффициент усиления синхронного усилителя;  $\sigma_{\text{ПОС}}$  – сечение поглощения из основного состояния (ПОС);  $\sigma_{\text{ВИ}}$  – сечение вынуждённого излучения (ВИ);  $\sigma_{\text{ПВС}}$  – сечение поглощения из возбуждённого состояния (ПВС).

Спектр (1) можно представить в единицах сечений [ $\text{см}^2$ ], если известно значение  $n_e L A$ . Это можно осуществить при подгонке коротковолнового края спектра (1), где можно пренебречь вкладом  $\sigma_{\text{ВИ}}$  и  $\sigma_{\text{ПВС}}$ , к спектру сечений поглощения из основного состояния ( $\sigma_{\text{ПОС}}$ ).

### Результаты исследования спектроскопических свойств

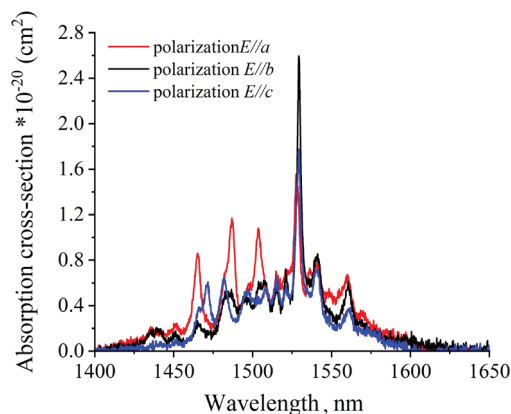
Спектры сечений поглощения кристалла Er,Yb:YGSO в области 1 мкм приведены на рисунке 5. Кристалл характеризуется достаточно широкой полосой поглощения с максимумом около 925 нм для поляризации  $E//b$  и узкой интенсивной полосой на 976 нм с максимальным сечением поглощения  $1,65 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  для поляризации  $E//a$ . Полуширина полосы с максимумом на 976 нм составляет около 2 нм.



**Рисунок 5** – Спектры сечений поглощения кристалла Er,Yb:YGSO в области 1 мкм

**Figure 5** – The absorption cross-section spectra of Er,Yb:YGSO crystal near 1 μm

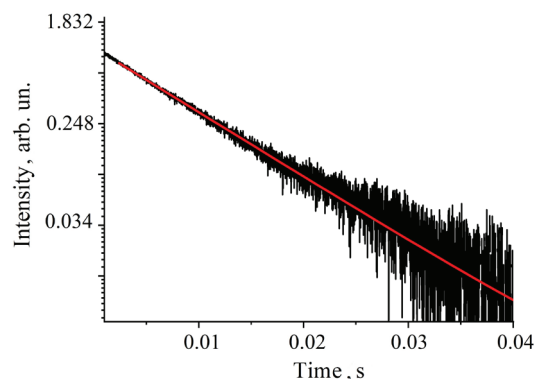
Спектры сечений поглощения в области 1,5 мкм приведены на рисунке 6. Максимальное сечение поглощения достигает  $2,5 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  на длине волны 1530 нм.



**Рисунок 6** – Спектры сечений поглощения кристалла Er,Yb:YGSO в области 1,5 мкм

**Figure 6** – The absorption cross-section spectra of Er,Yb:YGSO crystal near 1.5 μm

Целью проведения измерений кинетик люминесценции было определение времени жизни возбуждённых состояний  $^4I_{11/2}$  и  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия и  $^2F_{5/2}$  ионов иттербия в кристалле YGSO. Люминесценция возбуждалась импульсным излучением на длине волны 976 нм. Затухание люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия носило моноэкспоненциальный характер с характерным временем  $7,2 \pm 0,5$  мс. Результаты представлены на рисунке 7. Затухание люминесценции с  $^4I_{11/2}$  уровня также имело экспоненциальный характер, и время жизни этого уровня составило  $20 \pm 1$  мкс. Сравнительно короткое время жизни уровня  $^4I_{11/2}$  снижает потери, связанные с обратным переносом энергии от ионов эрбия к ионам иттербия и апконверсионными переходами ионов эрбия на вышележащие уровни.



**Рисунок 7** – Кинетика затухания люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия

**Figure 7** – The luminescence kinetics from  $^4I_{13/2}$  energy level of erbium ions

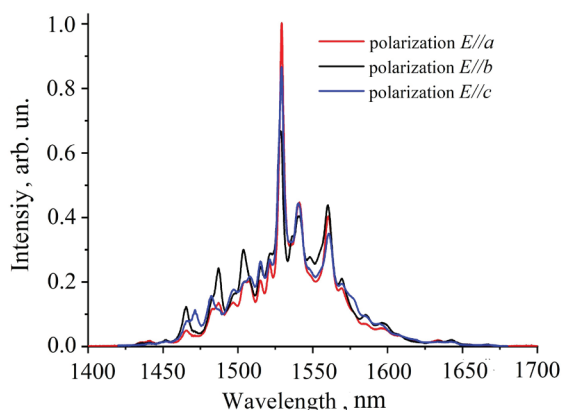
Эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия оценивалась по сокращению времени жизни уровня  ${}^2F_{5/2}$  ионов иттербия в кристалле YGSO, легированном ионами Er и Yb, относительно соответствующего времени жизни в кристалле, легированном только ионами иттербия, используя соотношение [20]:

$$\eta_{Yb \rightarrow Er} = 1 - \frac{\tau_{Yb,Er}({}^2F_{5/2})}{\tau_{Yb}({}^2F_{5/2})}, \quad (2)$$

где  $\eta_{Yb \rightarrow Er}$  – эффективность переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия;  $\tau_{Yb,Er}({}^2F_{5/2})$  – время жизни ионов иттербия на уровне  ${}^2F_{5/2}$  в кристалле, легированном ионами  $Er^{3+}$  и  $Yb^{3+}$ ;  $\tau_{Yb}({}^2F_{5/2})$  – время жизни ионов иттербия на уровне  ${}^2F_{5/2}$  в кристалле, легированном только ионами  $Yb^{3+}$ .

Время жизни ионов  $Yb^{3+}$  на верхнем уровне, измеренное в кристалле Er,Yb:YGSO, составило 180 мкс. В кристалле Yb:YGSO время жизни ионов  $Yb^{3+}$  на верхнем уровне составляет 1,92 мс [19]. Таким образом, эффективность переноса энергии  $Yb \rightarrow Er$  в кристалле Er,Yb:YGSO достигает 91 %.

Спектры люминесценции кристалла Er,Yb:YGSO в спектральной области 1400–1700 нм, измеренные при комнатной температуре со спектральным разрешением 0,5 нм, приведены на рисунке 8. Полоса люминесценции в этой области является широкой и структурированной, максимум полосы соответствует длине волны 1530 нм для всех трёх поляризаций. Длинноволновой край полосы люминесценции достигает 1650 нм.



**Рисунок 8** – Спектры люминесценции кристалла Er,Yb:YGSO в спектральной области 1400–1700 нм

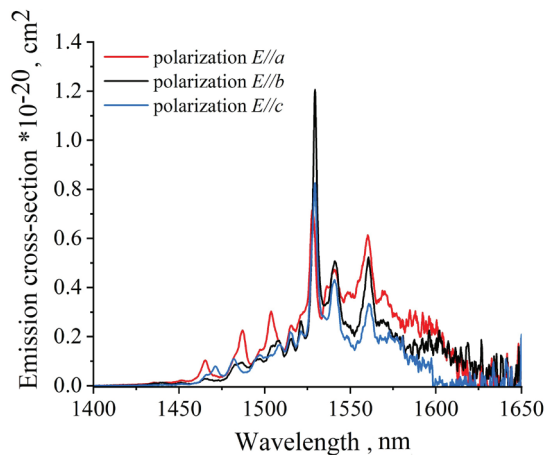
**Figure 8** – The luminescence spectra of Er,Yb:YGSO crystal in the spectral range of 1400–1700 nm

Спектры сечений вынужденного излучения (ВИ) для перехода  ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  ионов эрбия были определены по модифицированному методу соответствия [21]. Для расчёта радиационное время жизни  $\tau_{рад}$  уровня  ${}^4I_{13/2}$  ионов эрбия принималось равным измеренному времени жизни уровня  ${}^4I_{13/2}$  [16].

$$\sigma_{ви}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp(-hc / (kT\lambda))}{8\pi n^2 \tau_{рад} c \sum_{\gamma} \int \lambda^{-4} \sigma_{погл}^{\gamma}(\lambda) \exp(-hc / (kT\lambda)) d\lambda} \sigma_{погл}^{\alpha}(\lambda), \quad (3)$$

где  $\sigma_{ви}^{\alpha}(\lambda)$  – поперечное сечение вынужденного излучения на длине волны  $\lambda$ ;  $\lambda$  – длина волны света; индексы  $\alpha$  и  $\gamma$  обозначают состояние поляризации света;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура среды;  $n$  – показатель преломления кристалла;  $\sigma_{погл}^{\gamma}(\lambda)$  – поперечное сечение поглощения на длине волны  $\lambda$ .

Спектры сечений вынужденного излучения в спектральной области 1400–1650 нм приведены на рисунке 9. Наиболее интенсивный максимум с сечением вынужденного излучения  $1,2 \times 10^{-20} \text{ см}^2$  наблюдается для поляризации  $E//b$  на длине волны 1530 нм.



**Рисунок 9** – Спектры сечений вынужденного излучения кристалла Er,Yb:YGSO

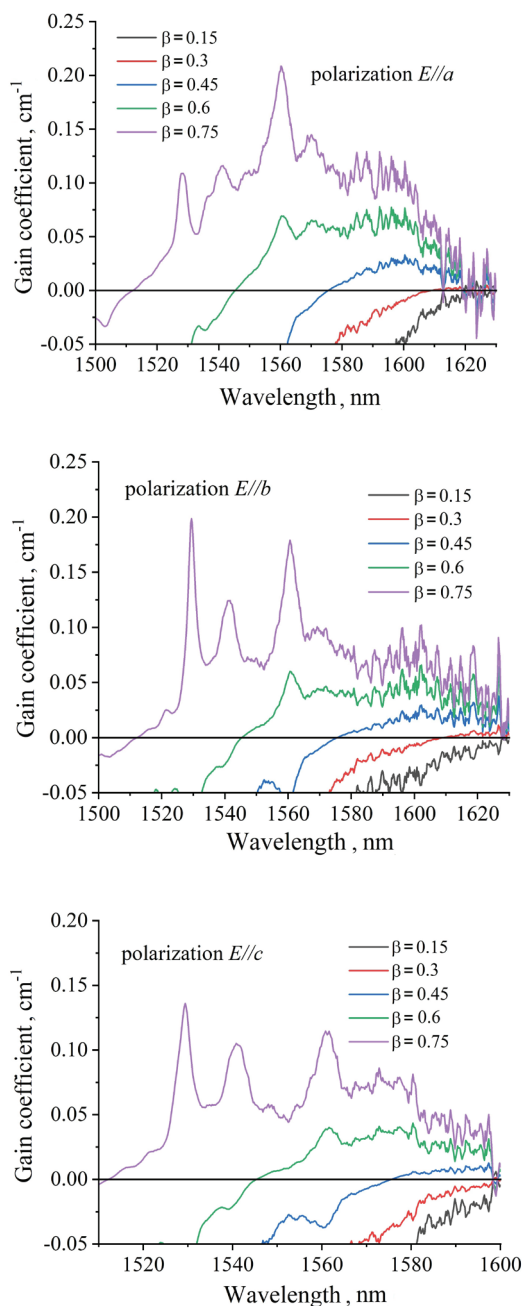
**Figure 9** – The stimulated emission cross-section spectra of Er,Yb:YGSO crystal

На рисунке 10 приведены спектры коэффициента усиления для различных значений относительной населённости  $\beta$  уровня  ${}^4I_{13/2}$  для трёх различных поляризаций:

$$g^{\alpha}(\lambda) = [\beta \sigma_{ви}^{\alpha}(\lambda) - (1-\beta) \sigma_{погл}^{\alpha}(\lambda)] N_0, \quad (4)$$

где  $g^{\alpha}(\lambda)$  – коэффициент усиления на длине волны

$\lambda$  для света с поляризацией  $\alpha$ ;  $\beta = N(^4I_{13/2})/N_{Er}$  – относительная инверсная населённость;  $\sigma_{ви}^\alpha(\lambda)$  – поперечное сечение вынужденного излучения на длине волны  $\lambda$ ;  $\sigma_{погл}^\alpha(\lambda)$  – поперечное сечение поглощения на длине волны  $\lambda$ ;  $N_0$  – полное число ионов эрбия.

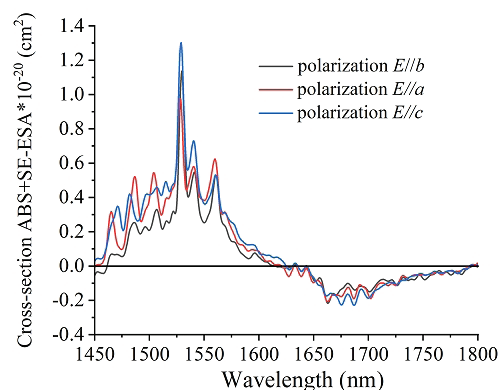


**Рисунок 10** – Спектры сечений усиления кристалла Er,Yb:YGSO

**Figure 10** – The gain spectra of Er,Yb:YGSO crystal

Поглощение из возбуждённого состояния в области 1,5 мкм (переход  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ ) является

одним из самых существенных каналов энергетических потерь в эрбий-содержащих средах. В случае спектрального перекрытия полосы поглощения из возбуждённого состояния с полосой усиления (как, например, в некоторых эрбиевых стёклах [4]) эффективность лазерной генерации в спектральной области 1500–1600 нм может существенно снизиться. Спектр поглощения из возбуждённого состояния кристалла Er,Yb:YGSO приведён на рисунке 11.



**Рисунок 11** – Спектры поглощения из возбуждённого состояния кристалла Er,Yb:YGSO в спектральной области 1450–1800 нм

**Figure 11** – The excited state absorption spectra of Er,Yb:YGSO crystal in the spectral range 1450–1800 nm

Спектр показывает, что полосы поглощения из возбуждённого состояния лежат в области 1625–1800 нм (участок отрицательных значений) и практически не перекрываются с полосами усиления в области 1500–1600 нм.

## Заключение

Проведены систематические исследования спектроскопических характеристик кристалла Er,Yb:YGSO как лазерной среды на область спектра 1,5–1,6 мкм. Измерены спектры поглощения и люминесценции ионов иттербия и эрбия в поляризованном свете, определены времена жизни возбуждённых состояний этих ионов. Проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттербия к ионам эрбия. Выполнен расчёт спектров поперечных сечений вынужденного излучения и усиления ионов эрбия. Измерения спектров поглощения из возбуждённого состояния показали, что



полоса поглощения из возбуждённого состояния ионов эрбия не перекрывается с полосой усиления в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Полученные результаты показали, что кристалл Er,Yb:YGSO является перспективным для использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм.

## References

1. Myers M.J., Myers J.D., Sarracino J.T., Hardy C.R., Guo B., Christian S.M., Myers J.A., Roth F., Myers A.G. LIBS system with compact fiber spectrometer, head mounted spectra display and hand held eye-safe erbium glass laser gun. *Solid State Lasers XIX: Technology and Devices*, 2010, vol. 7578, p. 75782G. DOI: 10.1117/12.841901
2. Taccheo S., Sorbello G., Laporta P., Karlsson G., Laurell F. 230-mW diode-pumped single-frequency Er:Yb laser at 1.5  $\mu\text{m}$ . *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, no. 13, pp. 19–21. DOI: 10.1109/68.903207
3. Huang J., Chen Y., Wang H., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huang Y. Efficient 1620 nm continuous-wave laser operation of Czochralski grown Er:Yb:Lu<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub> crystal. *Optics Express*, 2017, vol. 25, iss. 20, pp. 24001–24006. DOI: 10.1364/OE.25.024001
4. Schweizer T., Jensen T., Heumann E., Huber G. Spectroscopic properties and diode-pumped 1.6  $\mu\text{m}$  laser performance in Yb-codoped Er:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> and Er:Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>. *Optics communications*, 1995, vol. 118, no. 5–6, pp. 557–561. DOI: 10.1016/0030-4018(95)00284-F
5. Tolstik N.A., Troshin A.E., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I. Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystal. *Appl. Phys. B*, 2007, vol. 86, no. 2, pp. 275–278. DOI: 10.1007/s00340-006-2427-3
6. Bjurshagen S., Brynolfsson P., Pasiskevicius V., Parreu I., Pujol M.C., Peña A., Aguiló M., Díaz F. Crystal growth, spectroscopic characterization, and eye-safe laser operation of erbium- and ytterbium-codoped KLu(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>. *Applied optics*, 2008, vol. 47, no. 5, pp. 656–665. DOI: 10.1364/AO.47.000656
7. Chen Y., Lin Y., Huang J., Gong X., Luo Z., Huang Y. Spectroscopic and laser properties of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:LuAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal at 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ . *Optics Express*, 2010, vol. 18, iss. 13, pp. 13700–13707. DOI: 10.1364/OE.18.013700
8. Huang J., Chen Y., Gong X., Lin Y., Luo Z., Huang Y. Spectral and laser properties of Er:Yb:Sr<sub>3</sub>Lu<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> crystal at 1.5–1.6  $\mu\text{m}$ . *Optics Express*, 2013, vol. 3, iss. 11, pp. 1885–1892. DOI: 10.1364/OME.3.001885
9. Kisel V., Gorbachenya K., Yasukevich A., Ivashko A., Kuleshov N., Maltsev V., Leonyuk N. Passively Q-switched microchip Er, Yb:YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser. *Optics Lett.*, 2012, vol. 37, no. 13, pp. 2745–2747. DOI: 10.1364/OL.37.002745
10. Gorbachenya K.N., Deineka R.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Shekhovtsov A.N., Kosmyna M.B., Kuleshov N.V. Er,Yb:Ca<sub>3</sub>RE<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (RE=Y, Gd) – novel 1.5  $\mu\text{m}$  laser crystals. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 14–22. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-1-14-22
11. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Deineka R.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Mitina D.D., Volkova E.A., Leonyuk N.I. Continuous-wave Laser on Er,Yb-Codoped Pentaborate Crystal. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 271–280. DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-301-307
12. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. Eye-safe 1.55  $\mu\text{m}$  passively Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser. *Optics Lett.*, 2016, vol. 41, no. 5, pp. 918–921. DOI: 10.1364/OL.41.000918
13. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Prudnikova M.B., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Choi S.Y., Rotermund F., Kuleshov N.V. Passively Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser with single-walled carbon nanotube based saturable absorber. *Laser Phys. Lett.*, 2017, vol. 14, no. 3, p. 035802. DOI: 10.1088/1612-202X/aa5c68
14. Gorbachenya K., Kisel V., Yasukevich A., Loiko P., Mateos X., Maltsev V., Leonyuk N., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., Petrov V., Kuleshov N. Graphene Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser at 1550 nm. *Applied Optics*, 2017, vol. 56, no. 16, pp. 4745–4749. DOI: 10.1364/AO.56.004745
15. Tolstik N., Sorokin E., Karhu E.A., Gorbachenya K., Polyakov S.M., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Furtula V., Gibson U.J., Sorokina I.T. Spectral-luminescent properties of vapor deposited Cr:ZnS thin films and their application as saturable absorbers for 1.5- $\mu\text{m}$  erbium lasers. *Opt. Mater. Exp.*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 522–531. DOI: 10.1364/OME.8.000522
16. Li C., Wyon C., Richard Moncorge. Spectroscopic properties and fluorescence dynamics of Er<sup>3+</sup> and Yb<sup>3+</sup> in Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, vol. 28, no. 4, pp. 1209–1221. DOI: 10.1109/3.135248
17. Zong Y., Zhao G., Yan C., Xu X., Su L., Xu J. Growth and spectral properties of Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> crystal codoped with Er and Yb. *Journal of Crystal Growth*, 2006, vol. 294, no. 2, pp. 416–419. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2006.06.019

18. Thibault F., Pelenc D., Druon F., Zaouter Y., Jaquemet M., Georges P. Efficient diode-pumped  $\text{Yb}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  and  $\text{Yb}^{3+}:\text{Lu}_2\text{SiO}_5$  high-power femtosecond laser operation. *Opt. Lett.*, 2006, vol. 31, no. 10, pp. 1555–1557.

**DOI:** 10.1364/OL.31.001555

19. Du J., Liang X., Xu Y., Li R., Xu Z., Yan C., Zhao G., Su L., Xu J. Tunable and efficient diode-pumped  $\text{Yb}^{3+}:\text{GYSO}$  laser. *Optics Express*, 2006, vol. 14, iss. 8, pp. 3333–3338. **DOI:** 10.1364/OE.14.003333

20. Burns P.A., Dawes J.M., Dekker P., Piper J.A., Jiang H., Wang J. Optimization of Er,Yb:YCOB for CW laser operation. *IEEE J. Quant. Electr.*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1575–1582. **DOI:** 10.1109/JQE.2004.834935

21. Yasyukevich A.S., Shcherbitskii V.G., Kisel V.E., Mandrik A.V., Kuleshov N.V. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2004, vol. 71, no. 2, pp. 202–208.

**DOI:** 10.1023/B:JAPS.0000032875.04400.a0