

Методом Фюхтбауэра-Ладенбурга на основании спектров люминесценции, кроме того, были рассчитаны сечения стимулированного испускания  $\sigma_{se}$ . Наибольшей интенсивностью характеризовался спектр для излучения, поляризованного вдоль оси  $N_m$ , приведенный на рисунке 2. Пиковые значения поперечных сечений для четырех переходов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры переходов с уровня  ${}^4G_{5/2}$  кристалла  $Sm^{3+}:KYW$ : 1 – переход, 2 – спектральный диапазон, нм; 3 – рассчитанный коэффициент ветвления люминесценции  $\beta_{calc}$ ; 4 – экспериментально полученный коэффициент ветвления люминесценции  $\beta_{meas}$ ; 5 – сечение стимулированного испускания  $\sigma_{se}$ ,  $10^{-21}$  см<sup>2</sup>; 6 – радиационное время жизни  $\tau_{rad}$ , мкс

1	2	3	4	5	6
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$	550-582	0.033	0.0873	0.25	950
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$	585-625	0.295	0.3534	2.7	
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$	625-680	0.4568	0.4934	4	
${}^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$	685-730	0.08	0.0659	1.47	

С целью изучения динамики возбужденного состояния  ${}^4G_{5/2}$  проводились кинетические люминесцентные измерения. Возбуждение люминесценции осуществлялось в области 480 нм на высоколежащие энергетические уровни  ${}^4F_{5/2}+{}^4I_{13/2}$  с последующей быстрой безызлучательной релаксацией на исследуемый уровень  ${}^4G_{5/2}$ . Сигнал люминесценции был зарегистрирован на длинах волн 607, 647 и 712 нм. Во всех случаях сигнал люминесценции не имел участка разгорания, а затухание происходило по моноэкспоненциальному закону (рис.3). Измеренное время жизни уровня  ${}^4G_{5/2}$  иона  $Sm^{3+}$  составило 600 мкс.

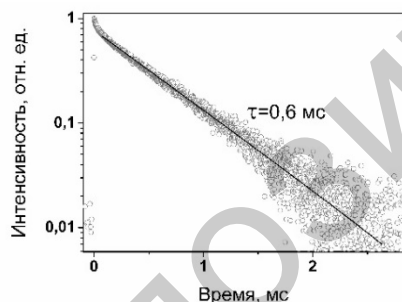


Рисунок 3 – Кинетика затухания люминесценции с уровня  ${}^4G_{5/2}$  в кристалле  $Sm^{3+}:KYW$

УДК 681

### **Er,Yb:Ca<sub>3</sub>Re<sub>2</sub>(VO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Re=Y, Gd) – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5–1,6 мкм**

Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>, Шеховцов А.Н.<sup>2</sup>, Космына М.Б.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт монокристаллов НАН Украины, Харьков, Украина

Лазерное излучение спектральной области 1,5–1,6 мкм благодаря ряду преимуществ получило широкое практическое применение в лазерной дальнометрии, системах оптической локации,

Квантовый выход люминесценции, определяемый как отношение измеренного времени жизни возбужденного уровня в кристалле к радиационному времени жизни этого уровня, рассчитанному по теории Джадда-Офельта, составил 63%.

Таким образом, определены спектры поперечного сечения поглощения и стимулированного испускания кристалла  $Sm^{3+}:KYW$  в поляризованном свете. Модифицированным методом Джадда-Офельта рассчитаны спектроскопические параметры материала. Радиационное время жизни уровня  ${}^4G_{5/2}$  составляет 950 мкс. Наиболее интенсивная полоса поглощения наблюдается на переходе  ${}^6H_{5/2} \rightarrow {}^6P_{3/2, 5/2}$  с пиковым значением сечения поглощения  $7,7 \times 10^{-20}$  см<sup>2</sup> для излучения, поляризованного вдоль оси оптической индикатрисы  $N_m$ . Максимальное сечение стимулированного испускания приходится на длину волны 652 нм и составляет  $4 \times 10^{21}$  см<sup>2</sup> для той же поляризации излучения.

1. Spectroscopy and laser operation of  $Sm^{3+}$ -doped lithium lutetium tetrafluoride ( $LiLuF_4$ ) and strontium hexaaluminate ( $SrAl_2O_9$ ) / D.-T. Marzahl [et. al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, No.16. – P. 21118-21127.
2. Absorption spectra and energy levels of  $Sm^{3+}:Y_3Al_5O_{12}$  / J.B. Gruber [et. al.] // Chemical Physics. – 1987. – Vol. 113. – P. 175-186.
3. Optical spectra and excited state relaxation dynamics of  $Sm^{3+}$  in  $Gd_2SiO_5$  single crystal / A. Strzep [et.al.] // Appl Phys B. – 2012. – Vol. 106, No. 1. – P. 85-93.
4. Judd–Ofelt analysis of spectroscopic properties of  $Sm^{3+}$  ions in  $K_2YF_5$  crystal / P. Van Do [et.al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 520. – P. 262-265.
5. Pugh-Thomas, D. Spectroscopic properties and Judd–Ofelt analysis of  $BaY_2F_8:Sm^{3+}$  / D. Pugh-Thomas // Journal of the Optical Society of America B. – 2014. – Vol. 31, No. 8. – P. 1777-1785.
6. Spectroscopy and laser operation of  $Sm^{3+}$ -doped lithium lutetium tetrafluoride ( $LiLuF_4$ ) and strontium hexaaluminate ( $SrAl_2O_9$ ) / D.-T. Marzahl [et. al.] // Optics Express. – 2015. – Vol. 23, No. 16. – P. 21118-21127.
7. Spectroscopic properties of  $Sm^{3+}$  ions in phosphate and fluorophosphate glasses / R. Vijaya [et.al.] // J. Non-Cryst. Sol. – 2013. – Vol. 365, No.1. – P. 85-92.
8. Judd–Ofelt parameters and radiative properties of  $Sm^{3+}$  ions doped zinc bismuth borate glasses / A. Agarwal [et.al.] // Optical Materials. – 2009. – Vol. 32, No. 2. – P. 339-344.
9. Dependence of the line strength of  $f-f$  transitions on the manifold energy. II. Analysis of  $Pr^{3+}$  in  $KPr_2O_{12}$  / A.A. Kornienko [et. al.] // Phys. Status Solidi A. – 1990. – Vol. 157. – P. 267-273.

медицине. Основным преимуществом данного излучения является сравнительная безопасность для глаз, эта особенность обусловлена высоким коэффициентом поглощения роговицы и хрусталика в

этой спектральной области, благодаря чему, чувствительной сетчатки достигает малая доля падающей энергии. Так же благодаря “окнам прозрачности” атмосферы в спектральном диапазоне 1,5–1,6 мкм, источники излучения данного диапазона используются в дистанционном зондировании Земли и в системах оптической локации.

Среди источников излучения спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм наибольшие распространение получили твердотельные лазеры на основе фосфатных стёкол с ионами Er и Yb, которые наиболее полно соответствуют следующим требованиям для получения эффективной лазерной генерации:

- эффективное поглощение излучения накачки ионами иттербия и последующий эффективный перенос энергии с ионов иттербия на ионы эрбия;
- быстрая безызлучательная релаксация с уровня  $^4I_{11/2}$  ионов эрбия на верхний лазерный уровень  $^4I_{13/2}$  для минимизации потерь, связанных с обратным переносом энергии от ионов иттербия к ионам эрбия и ап-конверсионными переходами на вышележащие уровни;
- высокий квантовый выход люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  для сохранения невысокого порога лазерной генерации.

Однако основным недостатком использования фосфатных стекол в качестве лазерных сред является их низкая теплопроводность (0,85 Вт/м·К) и, как следствие, низкий порог теплового разрушения [1]. Поэтому поиск кристаллической матрицы с ионами эрбия и иттербия, удовлетворяющей спектроскопическим требованиям для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм и имеющей высокую теплопроводность является актуальной задачей.

Кристаллы  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$  (CYB) и  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4$  (CGB), были выращены методом Чохральского в Институте монокристаллов НАН Украины. Из выращенных монокристаллов были изготовлены полированные образцы для дальнейших спектроскопических исследований.

Спектры поглощения кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$ , зарегистрированные при комнатной температуре в поляризованном свете на двухканальном спектрофотометре CARY-5000 в спектральном диапазоне 800–1100 нм представлены на рисунке 1.

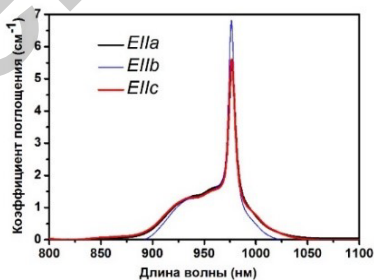


Рисунок 1 – Спектр поглощения кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в спектральной области 800–1100 нм в поляризованном свете

Спектры поглощения кристалла характеризуются широкой полосой в спектральном диапазоне

800–1100 нм с пиком на длине волны 976 нм. Максимальное значение коэффициента поглощения в пике составляет  $6,8 \text{ см}^{-1}$  для поляризации излучения  $E//b$ .

Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области 1,5 мкм (переход  $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$  ионов эрбия) для разных направлений распространения излучения, измеренные при комнатной температуре, приведены на рисунке 2.

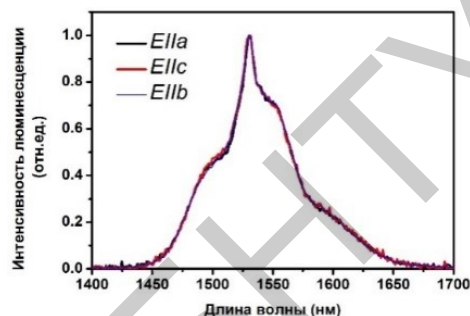


Рисунок 2 – Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области около 1,5 мкм в поляризованном свете

Спектры люминесценции характеризуются широкой полосой испускания в спектральной области 1400–1700 нм с пиком на длине волны 1531 нм.

Кинетические люминесцентные измерения в кристаллах CYB (рисунок 3) проводились с целью изучения динамики возбужденного состояния  $^4I_{13/2}$  ионов эрбия. Затухание люминесценции в спектральной области 1,5–1,6 мкм имело моноэкспоненциальный характер.

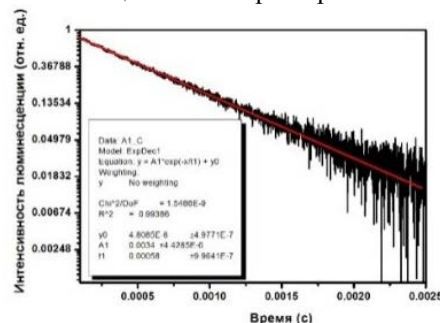


Рисунок 3 - Кинетика затухания люминесценции кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  в области около 1,5 мкм

Обработка данных, полученных в ходе измерений, показала, что время жизни уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  в кристалле CYB составило  $580 \pm 5$  мкс. Радиационное время жизни уровня  $^4I_{13/2}$  иона эрбия для кристалла  $\text{Er, Yb:CYB}$  известно из литературы и составляет 2,41 мс [2]. Таким образом, квантовый выход люминесценции с уровня  $^4I_{13/2}$  иона  $\text{Er}^{3+}$  составил 24 %.

Для определения эффективностей переноса энергии от ионов иттербия на ионы эрбия в кристаллах  $\text{Er, Yb:Ca}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$  оценивалось время затухания люминесценции с уровня  $^2F_{5/2}$  ионов иттербия. Для уменьшения влияния перепоглощения, время жизни возбужденного уровня измерялось в суспензиях иммерсионных жидкостей. Эффективность переноса энергии от

ионов иттербия к ионам эрбия в кристалле Er,Yb:СУВ составила 59 %.

Спектр поглощения кристалла Er(0.25 мас.%),Yb(1.22 мас.%):СГВ, зарегистрированный в неполяризованном свете в спектральной области 850–1100 нм представлен на рисунке 4. Максимальное значение коэффициента поглощения в пике на длине волны 976 нм составило  $1,8 \text{ см}^{-1}$ .

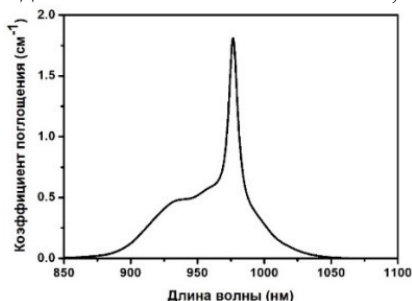


Рисунок 4 – Спектр поглощения кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 850-1100 нм

В спектре люминесценции наблюдается широкая полоса испускания с пиком на длине волны 1531 нм (рисунок 5).

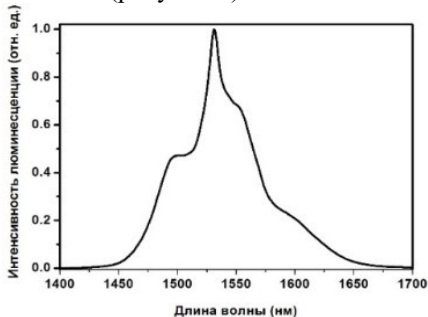


Рисунок 5 – Спектр люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1400-1700 нм

УДК 621.383.51

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ТОНКОПЛЕНОЧНЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ

Есман А.К., Потачиц В.А., Зыков Г.Л.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время наилучшие характеристики обеспечиваются на тонкопленочных солнечных элементах (СЭ) –  $\alpha$ -SiH, CdS/CdTe и соединениях Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>. Наиболее перспективны, как по достигаемой эффективности, так и по надёжности и возможностям снижения себестоимости являются СЭ с активным слоем на основе поликристаллических плёнок полупроводников Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (СІGS) [1-4].

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочным СЭ на основе CuInSe<sub>2</sub> в электричество.

Структура предлагаемого нами тонкопленочного СЭ на основе CuInSe<sub>2</sub> приведена на рисунке 1 [5]. На полированной лицевой поверхности подложки 1,

Затухание люминесценции в области около 1.5 мкм имело моноэкспоненциальный характер (рисунок 6). Время жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> иона Er<sup>3+</sup> составило  $550 \pm 5$  мкс.

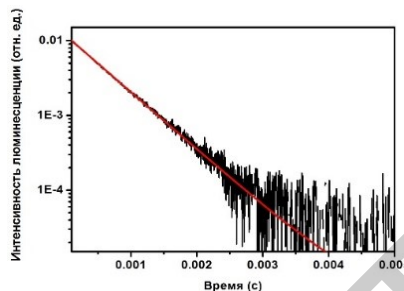


Рисунок 6 – Кинетика затухания люминесценции кристалла Er,Yb:СГВ в спектральной области 1,5–1,6 мкм

Радиационное время жизни уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> иона эрбия для кристалла Er,Yb:СГВ составляет 1,98 мс [2]. Квантовый выход люминесценции с уровня <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> иона Er<sup>3+</sup> составляет 27,8 %.

Таким образом, значения спектроскопических характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к лазерным эрбий-иттербиевым средам, для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области 1,5–1,6 мкм. Поэтому актуальной остается задача по изучению возможностей получения лазерной генерации и исследованию генерационных характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СГВ.

1. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5  $\mu\text{m}$  / S. Taccheo, G. Sorbello, P. Laporta, G. Karlsson, and F. Laurell // IEEE Photonics Technology Letters – 2001. – Vol. 13, № 1. – P.19-21.
2. Optical transition probability of Er<sup>3+</sup> ions in Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> codoped Ca<sub>3</sub>Ln<sub>2</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (Ln=Y, Gd, La) crystals / B. Wei, L.Z. Zhang, Z.B. Lin, and G.F. Wang // Materials Research Innovations. – 2007. – Vol. 11, № 3. – P. 154-157.

изготовленной из нержавеющей стали, с закругленными краями последовательно расположены электрически соединенные: первый электродный слой 2, первый гетеропереход CuInSe<sub>2</sub> 3, второй электродный слой 4, второй гетеропереход CuInSe<sub>2</sub>-CdS 5-6, прозрачный электрод 7. Первый 3 и второй 5-6 гетеропереходы по функциональному назначению являются соответственно термоэлектрическим и фотоэлектрическим преобразователями. Геометрические размеры подложки 1 составляли 41×41×9 мм. Толщины электродных слоев 2 и 4 из молибдена (Mo) и слоев CuInSe<sub>2</sub> 3 и 5 были равны 1 мкм, а толщины слоя 6 из сульфида кадмия (CdS) и электрода 7 из оксида цинка (ZnO) – 50 нм. Длина и ширина слоев 2, 3 и 4