

Методом Фюхтбауэра-Ладенбурга на основании спектров люминесценции, кроме того, были рассчитаны сечения стимулированного испускания σ_{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 β_{calc} ; 4 – экспериментально полученный коэффициент ветвления люминесценции β_{meas} ; 5 – сечение стимулированного испускания σ_{se} , 10^{-21} см²; 6 – радиационное время жизни τ_{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.

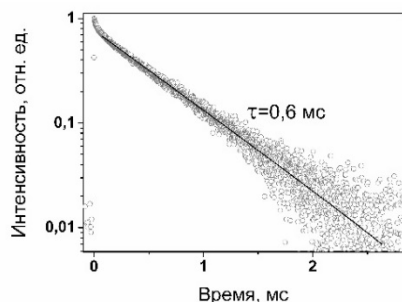


Рисунок 3 – Кинетика затухания люминесценции с уровня ${}^4G_{5/2}$ в кристалле $Sm^{3+}:KYW$

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 $7,7 \times 10^{-20}$ см² для излучения, поляризованного вдоль оси оптической индикатрисы N_m . Максимальное сечение стимулированного испускания приходится на длину волны 652 нм и составляет 4×10^{-21} см² 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_7 / A.A. Kornienko [et. al.] // Phys. Status Solidi A. – 1990. – Vol. 157. – P. 267-273.

УДК 681

Er,Yb:Ca₃Re₂(VO₃)₄ (Re=Y, Gd) – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АКТИВНЫЕ СРЕДЫ ДЛЯ ЛАЗЕРОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В СПЕКТРАЛЬНОМ ДИАПАЗОНЕ 1,5–1,6 мкм

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

¹НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

²Институт 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,

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 Er,Yb:Ca₃Y₂(BO₃)₄(CYB) и Er,Yb:Ca₃Gd₂(BO₃)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 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.

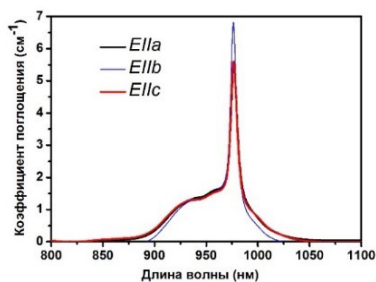


Рисунок 1 – Спектр поглощения кристалла Er,Yb:CYB в спектральной области 800–1100 нм в поляризованном свете

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 см⁻¹ для поляризации излучения E//b.

Спектры люминесценции кристалла 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.

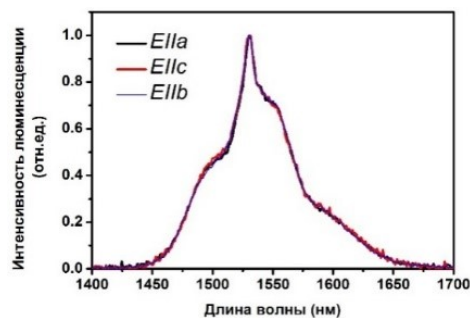


Рисунок 2 – Спектры люминесценции кристалла Er,Yb:CYB в области около 1,5 мкм в поляризованном свете

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.

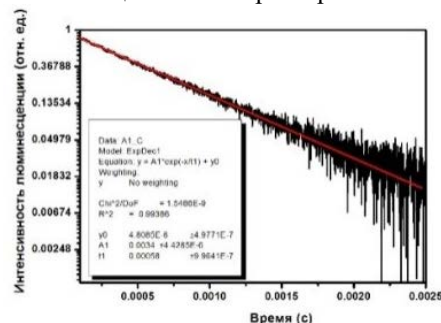


Рисунок 3 - Кинетика затухания люминесценции кристалла Er,Yb:CYB в области около 1,5 мкм

Обработка данных, полученных в ходе измерений, показала, что время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er³⁺ в кристалле CYB составило 580 ± 5 мкс. Радиационное время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона эрбия для кристалла Er,Yb:CYB известно из литературы и составляет 2,41 мс [2]. Таким образом, квантовый выход люминесценции с уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er³⁺ составил 24 %.

Для определения эффективностей переноса энергии от ионов иттербия на ионы эрбия в кристаллах Er,Yb:Ca₃Y₂(BO₃)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.%):СGB, 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 $1,8 \text{ см}^{-1}$.

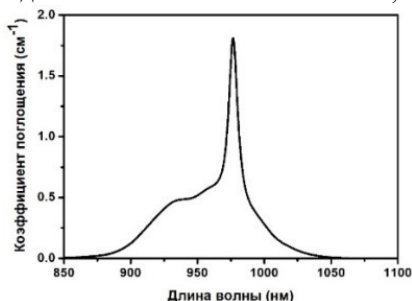


Рисунок 4 – Спектр поглощения кристалла Er,Yb:СGB в спектральной области 850-1100 нм

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

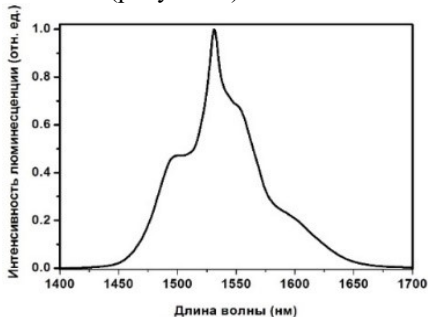


Рисунок 5 – Спектр люминесценции кристалла Er,Yb:СGB в спектральной области 1400-1700 нм

Затухание люминесценции в области около 1.5 мкм имело моноэкспоненциальный характер (рисунок 6). Время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} составило 550 ± 5 мкс.

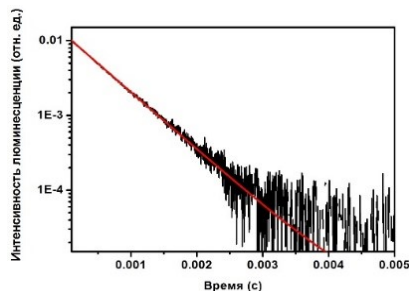


Рисунок 6 – Кинетика затухания люминесценции кристалла Er,Yb:СGB в спектральной области 1,5–1,6 мкм

Радиационное время жизни уровня ${}^4I_{13/2}$ иона эрбия для кристалла Er,Yb:СGB составляет 1,98 мс [2]. Квантовый выход люминесценции с уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} составляет 27,8 %.

Таким образом, значения спектроскопических характеристик кристаллов Er,Yb:СУВ и Er,Yb:СGB 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:СGB.

1. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5 μm / 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^{3+} ions in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped $\text{Ca}_3\text{Ln}_2(\text{BO}_3)_4$ (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.

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) – $\alpha\text{-SiH}$, CdS/CdTe и соединениях Cu(In,Ga)Se₂. Наиболее перспективны, как по достигаемой эффективности, так и по надёжности и возможностям снижения себестоимости являются СЭ с активным слоем на основе поликристаллических пленок полупроводников Cu(In,Ga)Se₂ (СIGS) [1-4].

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности преобразования солнечного излучения тонкопленочным СЭ на основе CuInSe₂ в электричество.

Структура предлагаемого нами тонкопленочного СЭ на основе CuInSe₂ приведена на рисунке 1 [5]. На полированной лицевой поверхности подложки 1,

изготовленной из нержавеющей стали, с закругленными краями последовательно расположены электрически соединенные: первый электродный слой 2, первый гетеропереход CuInSe₂ 3, второй электродный слой 4, второй гетеропереход CuInSe₂-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 CuInSe₂ 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