

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ CaNb₂O₆:Yb, Er, Tm

Е.А. Москвитина¹

katya92l@yandex.ru

В.А. Воробьев²

lum.npf@gmail.com

Б.М. Болотин³

bolotin70@yandex.ru

¹ ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»,
Ставрополь, Российская Федерация

² ООО НПФ «ЛЮМ», Ставрополь, Российская Федерация

³ НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Люминофор на основе CaNb₂O₆, активированный ионами иттербия, эрбия и тулия, синтезирован твердофазным методом при температуре 1200 °С. Представлены результаты рентгенофазового анализа соединения CaNb₂O₆:Yb, Er, Tm. Полученные рентгенограммы не содержат рефлексов, принадлежащих промежуточным фазам. Исследованы спектральные характеристики люминофора на основе ниобата кальция при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм. Спектры люминесценции имеют полосы в видимой и ИК-областях спектра. Спектр антистоксовой люминесценции содержит три полосы с максимумами при 560, 676 и 807 нм. Спектр люминесценции в ИК-области обладает тремя максимумами при 1010, 1540 и 1812 нм. Установлены закономерности изменения люминесцентных свойств соединений на основе CaNb₂O₆:Yb, Er, Tm. Определена оптимальная концентрация Tm³⁺ в системе, при которой достигается наибольшая эффективность люминесценции в области 1640...2000 нм с максимумом при 1812 нм. Рассмотрен механизм передачи энергии, который предполагает участие Yb³⁺ и Er³⁺ в качестве сенсibilизаторов люминесценции иона тулия. Использование эрбия в качестве дополнительного сенсibilизатора позволило увеличить интенсивность люминесценции в полосе 1812 нм в 1,5 раза

Ключевые слова

Ниобат кальция, люминесценция, иттербий, эрбий, тулий, сенсibilизатор

Поступила 09.12.2019

Принята 13.01.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. Получение люминофоров с эмиссией в ИК-области спектра является одним из современных направлений исследований. Поскольку их излучение не воспринимается глазом, такие люминофоры обладают широким спектром применений, например, в качестве люминесцентных меток, средств маркировки товаров и произведений искусства. Вследствие устойчивости к внешним факторам оксидные люминофоры обладают преимуществом по сравнению с сульфидными и оксигалогенидными системами.

Ниобат кальция кристаллизуется в орторомбическую структуру пространственной группы $Pbcn$ (60) [1]. Ниобат кальция получил широкое распространение вследствие своих пьезоэлектрических и фотокаталитических свойств, а также высокой химической стабильности [2]. Вместе с этим CaNb_2O_6 является люминесцентной матрицей. Активация метаниобата кальция ионами редкоземельных металлов для получения эмиссии в видимой области спектра рассмотрена в [3–12]. Исследований люминесценции в ИК-области спектра немного, поэтому получение люминофоров с эмиссией в области 1500...2000 нм является актуальной задачей.

Цель работы — исследование оптических свойств ИК-люминофора $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb, Er, Tm}$ с перовскитной структурой [2]. Поскольку ниобат кальция обладает сравнительно низким значением энергии фононов (900 см^{-1}) [13, 14], соединения могут рассматриваться в качестве перспективных люминофоров ближнего ИК-диапазона.

Экспериментальная часть. В процессе исследований проведен синтез образцов состава $(\text{Ca}_{0,78-x}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_x)\text{Nb}_2\text{O}_6$, где $0,005 \leq x \leq 0,15$. В состав шихты входили CaCO_3 (ОСЧ), Nb_2O_5 (ОСЧ), Yb_2O_3 (ОСЧ), Er_2O_3 (ОСЧ), Tm_2O_3 (ОСЧ) добавляли в виде солянокислого раствора. В шихту также вводили LiCl (ОСЧ) в качестве минерализатора в количестве 3 мол. %. Твердофазный синтез проводили при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 12 ч на воздухе.

Спектральные характеристики полученных образцов исследовали с применением монохроматора МДР-204. В качестве фотоприемника использовали ФПУ–ФС (PbS). Возбуждение люминесценции осуществляли излучением лазерного диода с длиной волны 940 нм мощностью 50 мВт.

Рентгенофазовый анализ выполняли на установке «Дифрей 401» с использованием $\text{Cu } K_{\alpha 1}$ в диапазоне значений угла 2θ $0 \dots 75^\circ$ при комнатной температуре. Идентификацию фаз осуществляли с помощью картотеки JCPDS. Анализ кристаллической структуры соединения проводили методом полнопрофильного анализа Ритвельда с использованием программного обеспечения *BaseDiffract*.

Обсуждение результатов. Дифракционные рефлексии рентгенограмм образцов, полученных в процессе эксперимента, характерны для мета-ниобата кальция. Дифрактограмма не имеет дополнительных пиков, соответствующих промежуточным или примесным фазам. Параметры решетки $a = 5,746$, $b = 15,163$, $c = 5,152$. Вследствие схожести атомных радиусов ионов активаторов Yb^{3+} , Tm^{3+} , Er^{3+} и Ca^{2+} в матрице люминофора ($\text{Yb}^{3+} = 0,99 \text{ \AA}$, $\text{Er}^{3+} = 0,89 \text{ \AA}$, $\text{Tm}^{3+} = 0,98 \text{ \AA}$ и $\text{Ca}^{2+} = 1,02 \text{ \AA}$) при внедрении в ниобат кальция формируются твердые растворы замещения. Результаты рентгенофазового анализа соединения типа $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er , Tm приведены на рис. 1.

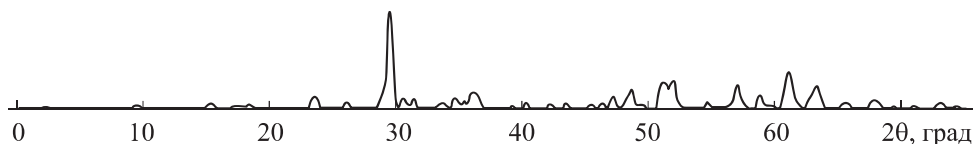


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа соединения $(\text{Ca}_{0,77}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,01})\text{Nb}_2\text{O}_6$

Спектр люминесценции соединения $(\text{Ca}_{0,775}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,005})\text{Nb}_2\text{O}_6$ при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм, записанный в области 520...850 нм, показан на рис. 2. Спектр обладает эмиссионной полосой с максимумом при 807 нм, соответствующей переходу ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ в ионе тулия. Люминесценция при 560 и 676 нм соответствует переходам с уровней ${}^4\text{S}_{3/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2}$ на ${}^4\text{I}_{15/2}$ иона Er^{3+} . Полосы люминесценции имеют структуру, схожую со структурой полос люминесценции ниобата кальция с добавлением иттербия и эрбия, полученной в [15]. В рассматриваемом случае при увеличении концентрации тулия наблюдается перераспределение интенсивностей полос при 560 и 676 нм в пользу красной полосы.

Спектр люминесценции соединения $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er , Tm при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм (рис. 3) имеет максимумы при 1010, 1540 и 1812 нм, соответствующие 4f-4f-переходам в Yb^{3+} , Er^{3+} и Tm^{3+} . Наиболее интенсивная полоса в области 970...1100 нм соответствует переходу между уровнями ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ иона иттербия. К переходу ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ в ионе эрбия относится широкая полоса в области 1470...1640 нм. Пик люминесценции при 1812 нм соответствует переходу ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$, характерному для ионов тулия.

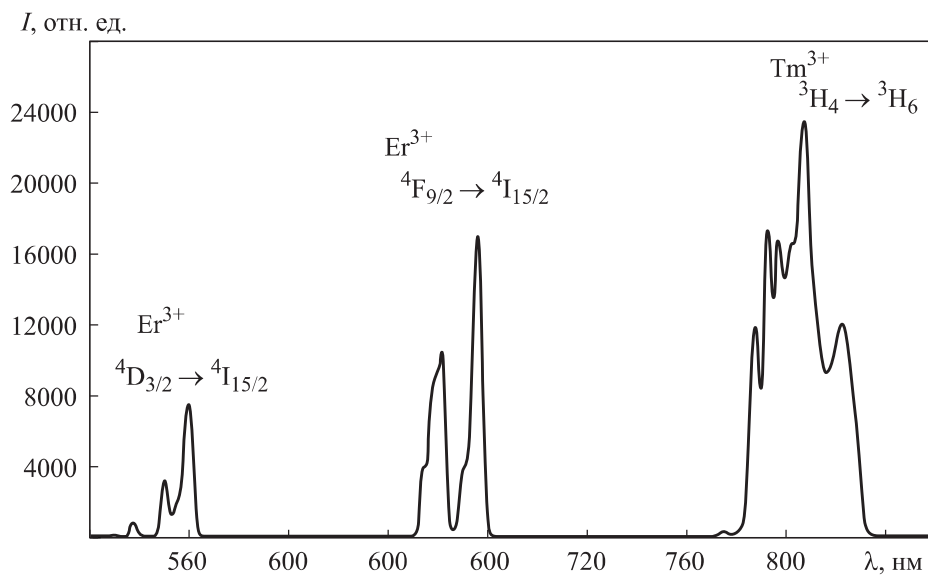


Рис. 2. Спектр люминесценции соединения $(\text{Ca}_{0,775}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,005})\text{Nb}_2\text{O}_6$ в области 520...850 нм при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм

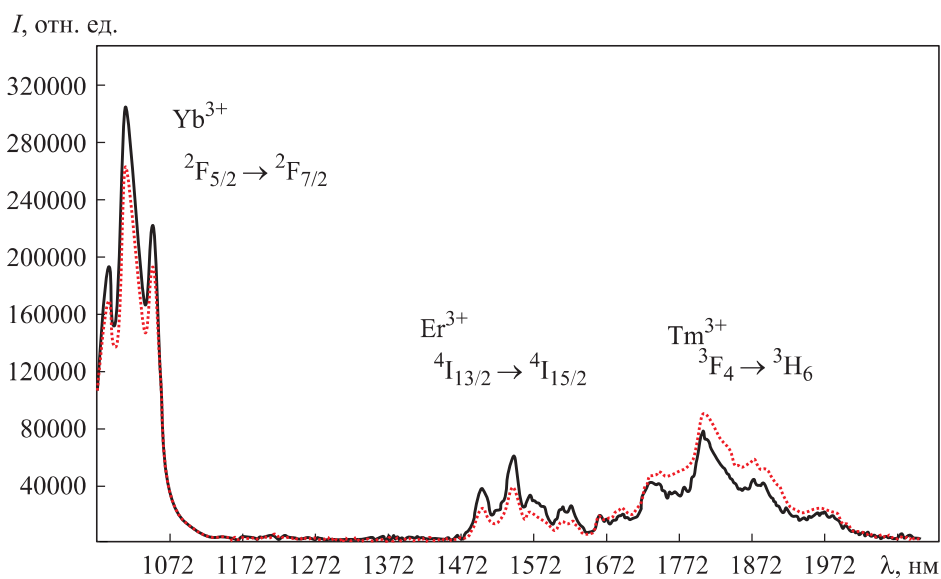


Рис. 3. Спектр люминесценции соединений $(\text{Ca}_{0,775}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,005})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (сплошная линия) и $(\text{Ca}_{0,77}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,01})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (штрихпунктирная) в области 970...2070 нм при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм

Для построения концентрационной зависимости синтезирована серия образцов. Зависимости интенсивности люминесценции в полосах 560, 676, 807, 1010, 1540 и 1812 нм от концентрации Tm^{3+} приведены

на рис. 4. Увеличение концентрации ионов тулия в соединении приводит к снижению яркости полос люминесценции, характерных для ионов иттербия и эрбия. В свою очередь интенсивность полосы 1812 нм при малых концентрациях Tm^{3+} возрастает и при концентрациях более 1 мол. % снижается. Концентрационное тушение люминесценции наблюдается вследствие увеличения числа возможных безизлучательных переходов между уровнями энергий заряженных ионов.

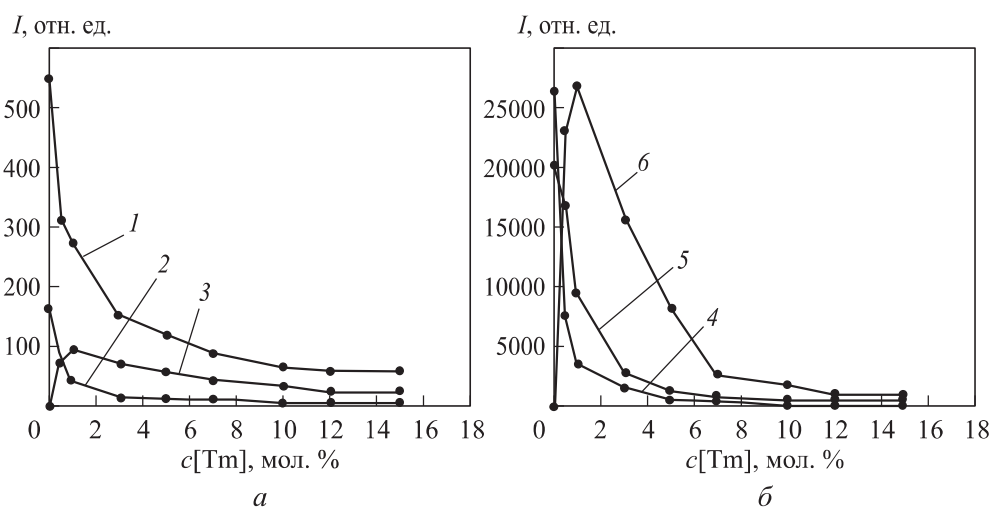


Рис. 4. Зависимость интенсивностей люминесценции в полосах 1010 (1), 1540 (2), 1812 (3), 560 (4), 676 (5) и 800 нм (6) от концентрации ионов тулия в соединении $(Ca_{0,78-x}Yb_{0,15}Er_{0,07}Tm_x)Nb_2O_6$ в ИК- (а) и видимой (б) области спектра

Рост интенсивности в полосе тулия и ее снижение в полосах иттербия и эрбия свидетельствуют о существовании переноса энергии между уровнями ионов. Процесс передачи энергии от ионов иттербия к ионам эрбия рассмотрен в [16]. Наличие процесса переноса энергии с уровней Yb^{3+} и Er^{3+} в пользу люминесценции ионов Tm^{3+} показывает, что ионы иттербия и эрбия в этом соединении проявляют себя как сенсбилизаторы люминесценции иона тулия.

Наибольшая интенсивность полосы люминесценции с максимумом при 1812 нм наблюдается в соединении $(Ca_{0,77}Yb_{0,15}Er_{0,07}Tm_{0,01})Nb_2O_6$. Проведен сравнительный анализ интенсивностей длинноволновой люминесценции. Для сравнения использовали опорный образец без ионов эрбия. Спектры люминесценции соединений $(Ca_{0,84}Yb_{0,15}Tm_{0,01})Nb_2O_6$ и $(Ca_{0,77}Yb_{0,15}Er_{0,07}Tm_{0,01})Nb_2O_6$ показаны на рис. 5. Опираясь на полученные

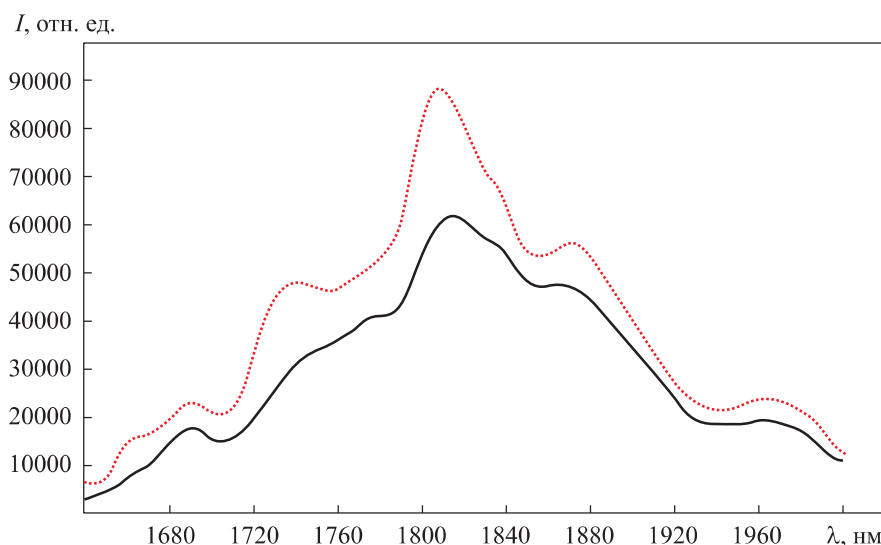


Рис. 5. Спектры ИК-люминесценции соединений $(\text{Ca}_{0,84}\text{Yb}_{0,15}\text{Tm}_{0,01})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (сплошная линия) и $(\text{Ca}_{0,77}\text{Yb}_{0,15}\text{Er}_{0,07}\text{Tm}_{0,01})\text{Nb}_2\text{O}_6$ (штрихпунктирная линия) в диапазоне 1640...2000 нм при возбуждении лазером с длиной волны 940 нм

результаты, можно сделать следующий вывод: ионы Er^{3+} также являются сенсбилизатором люминесценции Tm^{3+} и позволяют увеличить интенсивность люминесценции в 1,5 раза.

Механизм переноса энергии между ионами Yb^{3+} , Er^{3+} к Tm^{3+} является многоступенчатым. При возбуждении соединения лазерным диодом с длиной волны 940 нм происходит переход Yb^{3+} из основного состояния $^2\text{F}_{7/2}$ в возбужденное $^2\text{F}_{5/2}$. Вследствие близости уровней $^2\text{F}_{5/2}$ Yb^{3+} и $^4\text{I}_{13/2}$ Er^{3+} происходит передача энергии между сенсбилизаторами. В результате обмена энергией между донором $^4\text{I}_{13/2}$ Er^{3+} и акцептором $^3\text{F}_4$ Tm^{3+} с последнего происходит переход в основное состояние $^3\text{H}_6$, сопровождающееся эмиссией в области 1640...2000 нм.

Заключение. В процессе исследования проведен синтез твердых растворов $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb, Er, Tm}$, исследованы спектрально-люминесцентные свойства и показана возможность использования этих соединений в качестве люминофоров ближнего ИК-диапазона. Рентгенограммы соединений не выявили наличие промежуточных фаз и дополнительных примесей. Спектры люминесценции в области 970...2100 нм содержат линии, соответствующие характерным переходам в ионах Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} . Подбор концентраций активаторов позволил получить интенсивную эмиссию в области 1640...2000 нм с максимумом при 1812 нм. Наибольший

выход люминесценции в полосе 1812 нм достигается при концентрациях иттербия 15 мол. %, эрбия 7 мол. % и тулия 1 мол. % в $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er, Tm. Добавление эрбия в $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Tm позволяет увеличить интенсивность люминесценции тулия в 1,5 раза.

Анализ полученных оптических свойств позволяет сделать вывод о том, что в $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er, Tm ионы Yb^{3+} и Er^{3+} выступают в качестве сенсбилизаторов люминесценции Tm^{3+} .

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cummings J.P., Srmonsens S.H. The crystal structure of calcium niobate (CaNb_2O_6). *Am. Miner.*, 1970, vol. 55, no. 1-2, pp. 90–97.
- [2] Singh K.N., Bajpai P.K. Synthesis, structural, dielectric and electrical impedance study of CaNb_2O_6 phase pure material. *Int. J. Phys. Sci.*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 501–510.
- [3] Cho I.-S., Bae S.T., Kim D.H., et al. Effects of crystal and electronic structures of ANb_2O_6 (A = Ca, Sr, Ba) metaniobate compounds on their photocatalytic H_2 evolution from pure water. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2010, vol. 35, iss. 23, pp. 12954–12960. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.057>
- [4] Ballman A.A., Porto S.P.S., Yariv A. Calcium niobate $\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$ — a new laser host crystal. *J Appl. Phys.*, 1963, vol. 34, no. 11, pp. 3155–3156. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1729154>
- [5] Li K., Liu X., Zhang Y., et al. Host-sensitized luminescence properties in $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Ln}^{3+}$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}/\text{Dy}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$) phosphors with abundant colors. *Inorg. Chem.*, 2015, no. 54, no. 1, pp. 323–333. DOI: <https://doi.org/10.1021/ic502493c>
- [6] Li J.H., Lui X.H., Wu J.B. Efficient diode-end-pumped $\text{Yb}:\text{CaNb}_2\text{O}_6$ thin-disk laser at 1003 nm and second-harmonic generation for an emission at 501.5 nm. *Laser Phys. Lett.*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 199–203. DOI: <https://doi.org/10.1002/lapl.201110118>
- [7] Cao R., Qin Z., Jiang S., et al. Enhanced emission of $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Sm}^{3+}$ phosphor by codoping $\text{Na}^+/\text{B}^{3+}$ and the emission properties. *Bull. Mater. Sci.*, 2016, vol. 39, iss. 1, pp. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-015-1128-0>
- [8] Zhou R., Wei X., Duan C., et al. Intense blue-green cooperative luminescence from Yb^{3+} pairs within CaNb_2O_6 matrix. *ECS J. Solid State Sci.*, 2012, vol. 1, no. 6, pp. 147–152. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.014206jss>
- [9] Li N., Wang W., Duan W., et al. Upconversion luminescence of $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped CaNb_2O_6 thin films. *Chem. Phys. Lett.*, 2016, vol. 644, pp. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2015.11.041>
- [10] Wang Y., Duan P., Li N., et al. Structure and properties of Dy^{3+} -doped CaNb_2O_6 nanophosphors. *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 2015, vol. 12, no. 9, pp. 2648–2651. DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2015.4157>
- [11] Blasse G., van Leur M.G.J. Luminescence and energy transfer in the columbite structure. *Mater. Res. Bull.*, 1985, vol. 20, iss. 9, pp. 1037–1045. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(85\)90202-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(85)90202-8)

[12] McAlister W.A. Rare-Earth activated niobates. *J. Electrochem. Soc.*, 1984, vol. 131, no. 5, pp. 1207–1211. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2115779>

[13] Blasse G., Grabmaier B.C. Luminescent materials. Springer, 1994.

[14] Blasse G., Corsmit A.F. Electronic and vibrational spectra of ordered perovskites. *J. Solid State Chem.*, 1973, vol. 6, iss. 4, pp. 513–518.

DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4596\(73\)80008-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4596(73)80008-8)

[15] Mateos L., García-Santizo J.V., Molina P., et al. Infrared to visible up conversion energy transfer confined at ordered micro-ring structures. *Opt. Mater.*, 2012, vol. 34, iss. 12, pp. 2035–2040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2012.03.013>

[16] Воробьев В.А., Леденева Е.А. Изучение влияния примесей иттербия и эрбия на люминесценцию ниобата кальция CaNb_2O_6 . *Технические науки: проблемы и решения. Сб. ст. по матер. VI Междунар. практ. конф. М., Интернаука, 2017, с. 130–136.*

Москвитина Екатерина Андреевна — аспирантка, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (Российская Федерация, 355017, Ставрополь, ул. Пушкина, д. 1).

Воробьев Виктор Андреевич — д-р техн. наук, директор ООО НПФ «ЛЮМ» (Российская Федерация, 355035, Ставрополь, 1-я Промышленная ул., д. 13, оф. 1).

Болотин Борис Маркович — д-р хим. наук, заведующий лабораторией органических люминофоров НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА (Российская Федерация, 107076, Москва, Богородский вал, д. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Москвитина Е.А., Воробьев В.А., Болотин Б.М. Исследование люминесцентных свойств $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb, Er, Tm}$. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 3 (90), с. 78–87.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-3-78-87>

STUDY OF LUMINESCENT PROPERTIES OF $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb, Er, Tm}$

E.A. Moskvitina¹

katya92l@yandex.ru

V.A. Vorobiev²

lum.npf@gmail.com

B.M. Bolotin³

bolotin70@yandex.ru

¹North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

²LUM Research and Production Company LLC, Stavropol, Russian Federation

³Institute of Chemical Reagents and High Purity Chemical Substances, National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russian Federation

Abstract

We used solid phase synthesis at 1200 °C to create a luminophore based on CaNb_2O_6 and activated by ytterbium, erbium, and thulium ions. We present

Keywords

Calcium niobate, luminescence, ytterbium, erbium, thulium, sensitiser

X-ray phase analysis results for the $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er, Tm compound. The X-ray diffraction patterns obtained do not contain reflexes belonging to the intermediate phases. We investigated spectral properties of a calcium niobate-based luminophore upon excitation by a 940 nm laser. There are bands in the visible and IR regions to be found in the luminescence spectra. The up-conversion (anti-Stokes emission) luminescence spectrum comprises three bands peaking at 560, 676 and 807 nm. In the IR range, there are three peaks to be detected in the luminescence spectrum at 1010, 1540 and 1812 nm. We established the luminescence variation patterns for compounds based on $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb}$, Er, Tm. We determined the optimum Tm^{3+} concentration in the system that makes it possible to achieve the highest luminescence efficiency in the 1640–2000 nm range peaking at 1812 nm. We considered an energy transfer mechanism involving Yb^{3+} and Er^{3+} as luminescence stabilisers in a thulium ion. Employing erbium as an additional sensitiser allowed the luminescence intensity in the 1812 nm band to be increased by 1.5 times

Received 09.12.2019

Accepted 13.01.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Cummings J.P., Srmonsden S.H. The crystal structure of calcium niobate (CaNb_2O_6). *Am. Miner.*, 1970, vol. 55, no. 1-2, pp. 90–97.
- [2] Singh K.N., Bajpai P.K. Synthesis, structural, dielectric and electrical impedance study of CaNb_2O_6 phase pure material. *Int. J. Phys. Sci.*, 2010, vol. 14, no. 4, pp. 501–510.
- [3] Cho I.-S., Bae S.T., Kim D.H., et al. Effects of crystal and electronic structures of ANb_2O_6 (A = Ca, Sr, Ba) metaniobate compounds on their photocatalytic H_2 evolution from pure water. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2010, vol. 35, iss. 23, pp. 12954–12960. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.057>
- [4] Ballman A.A., Porto S.P.S., Yariv A. Calcium niobate $\text{Ca}(\text{NbO}_3)_2$ — a new laser host crystal. *J Appl. Phys.*, 1963, vol. 34, no. 11, pp. 3155–3156. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1729154>
- [5] Li K., Liu X., Zhang Y., et al. Host-sensitized luminescence properties in $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Ln}^{3+}$ ($\text{Ln}^{3+} = \text{Eu}^{3+}/\text{Tb}^{3+}/\text{Dy}^{3+}/\text{Sm}^{3+}$) phosphors with abundant colors. *Inorg. Chem.*, 2015, no. 54, no. 1, pp. 323–333. DOI: <https://doi.org/10.1021/ic502493c>
- [6] Li J.H., Lui X.H., Wu J.B. Efficient diode-end-pumped $\text{Yb}:\text{CaNb}_2\text{O}_6$ thin-disk laser at 1003 nm and second-harmonic generation for an emission at 501.5 nm. *Laser Phys. Lett.*, 2012, vol. 9, no. 3, pp. 199–203. DOI: <https://doi.org/10.1002/lapl.201110118>
- [7] Cao R., Qin Z., Jiang S., et al. Enhanced emission of $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Sm}^{3+}$ phosphor by codoping $\text{Na}^+/\text{B}^{3+}$ and the emission properties. *Bull. Mater. Sci.*, 2016, vol. 39, iss. 1, pp. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12034-015-1128-0>

- [8] Zhou R., Wei X., Duan C., et al. Intense blue-green cooperative luminescence from Yb^{3+} pairs within CaNb_2O_6 matrix. *ECS J. Solid State Sci.*, 2012, vol. 1, no. 6, pp. 147–152. DOI: <https://doi.org/10.1149/2.014206jss>
- [9] Li N., Wang W., Duan W., et al. Upconversion luminescence of $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped CaNb_2O_6 thin films. *Chem. Phys. Lett.*, 2016, vol. 644, pp. 152–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2015.11.041>
- [10] Wang Y., Duan P., Li N., et al. Structure and properties of Dy^{3+} -doped CaNb_2O_6 nanophosphors. *J. Comput. Theor. Nanosci.*, 2015, vol. 12, no. 9, pp. 2648–2651. DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2015.4157>
- [11] Blasse G., van Leur M.G.J. Luminescence and energy transfer in the columbite structure. *Mater. Res. Bull.*, 1985, vol. 20, iss. 9, pp. 1037–1045. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(85\)90202-8](https://doi.org/10.1016/0025-5408(85)90202-8)
- [12] McAlister W.A. Rare-Earth activated niobates. *J. Electrochem. Soc.*, 1984, vol. 131, no. 5, pp. 1207–1211. DOI: <https://doi.org/10.1149/1.2115779>
- [13] Blasse G., Grabmaier B.C. Luminescent materials. Springer, 1994.
- [14] Blasse G., Corsmit A.F. Electronic and vibrational spectra of ordered perovskites. *J. Solid State Chem.*, 1973, vol. 6, iss. 4, pp. 513–518. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4596\(73\)80008-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4596(73)80008-8)
- [15] Mateos L., García-Santizo J.V., Molina P., et al. Infrared to visible up conversion energy transfer confined at ordered micro-ring structures. *Opt. Mater.*, 2012, vol. 34, iss. 12, pp. 2035–2040. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2012.03.013>
- [16] Vorobyev V.A., Ledeneva E.A. [Study on effect of ytterbium and erbium impurities on the luminescence of CaNb_2O_6 calcium niobate]. *Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya. Sb. st. po mater. VI Mezhdunar. prakt. konf.* [Technical Sciences: Problems and Solutions. Proc. VI Int. Pract. Conf.]. Moscow, Internauka Publ., 2017, pp. 130–136 (in Russ.).

Moskvitina E.A. — Post-Graduate Student, North Caucasus Federal University (Pushkina ul. 1, Stavropol, 355017 Russian Federation).

Vorobiev V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Director, LUM Research and Production Company LLC (1-ya Promyshlennaya ul. 13, office 1, Stavropol, 355035 Russian Federation).

Bolotin B.M. — Dr. Sc. (Chem.), Head of Laboratory of Organic Luminophores, Institute of Chemical Reagents and High Purity Chemical Substances, National Research Centre Kurchatov Institute (Bogorodskiy val 3, Moscow, 107076 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Moskvitina E.A., Vorobiev V.A., Bolotin B.M. Study of luminescent properties of $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{Yb, Er, Tm}$. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 3 (90), pp. 78–87 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2020-3-78-87>