

УДК 535.331

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-980-986

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ОКСИДОВ НА АП-КОНВЕРСИОННУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ ИОНОВ ЭРБИЯ В ЩЕЛОЧНОГЕРМАНАТНЫХ СТЕКЛАХ

Н.К. Кузьменко<sup>a</sup>, В.А. Асеев<sup>a</sup>, М.А. Ходасевич<sup>b</sup>, Ю.К. Фёдоров<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>b</sup> Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Республика Беларусь

Адрес для переписки: nataliakuz01@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию 11.09.19, принята к печати 12.10.19

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** Кузьменко Н.К., Асеев В.А., Ходасевич М.А., Фёдоров Ю.К. Влияние добавок оксидов на ап-конверсионную люминесценцию ионов эрбия в щелочногерманатных стеклах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 6. С. 980–986. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-980-986

### Аннотация

Исследовано влияние различных оксидов на ап-конверсионную люминесценцию иона эрбия в натриево-германатном стекле. Методом высокотемпературного синтеза при температуре 1250 °С в корундовых тиглях синтезировано стекло состава 58,95GeO<sub>2</sub>–27,79Na<sub>2</sub>O–8,67Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–4,34LaO–0,25Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> мол% с добавлением следующих оксидов: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, BaO, TiO<sub>2</sub>, PbO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO. Спектры ап-конверсионной люминесценции регистрировались при возбуждении излучением полупроводникового лазера с длиной волны 975 нм в диапазоне длин волн 450–700 нм. На спектрах люминесценции выделены три полосы, соответствующие излучательным переходам иона эрбия: <sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> с максимумом около 520 нм; <sup>4</sup>S<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> максимум 550 нм и <sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> максимум 670 нм. Выполнено сравнение полученных спектров ап-конверсионной люминесценции стекла с добавками с исходным стеклом. Показано влияние различных оксидов на перераспределение относительной интенсивности полос люминесценции. По сравнению с красной полосой (<sup>4</sup>F<sub>9/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>) люминесценции интенсивность зеленой полосы (<sup>2</sup>H<sub>11/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>15/2</sub>) максимальна для стекла с добавкой оксида фосфора, минимальной интенсивностью обладает стекло с добавкой оксида свинца. Полученная зависимость относительных интенсивностей полос ап-конверсионной люминесценции от состава стекла может найти практическое применение при разработке оптических люминесцентных датчиков, а также ап-конвертеров для солнечных батарей.

### Ключевые слова

ап-конверсионная люминесценция, германатные стекла, эрбий

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 18-58-00043 Бел\_а.

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-980-986

## EFFECT OF OXIDE ADDITIVES ON UP-CONVERSION LUMINESCENCE OF ERBIUM IONS IN ALKALINE GERMANATE GLASSES

N.K. Kuzmenko<sup>a</sup>, V.A. Aseev<sup>a</sup>, M.A. Khodasevich<sup>b</sup>, Yu.K. Fedorov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>b</sup> B.I. Stepanov Institute of Physics, Minsk, 220072, Republic of Belarus

Corresponding author: nataliakuz01@yandex.ru

### Article info

Received 11.09.19, accepted 12.10.19

Article in Russian

**For citation:** Kuzmenko N.K., Aseev V.A., Khodasevich M.A., Fedorov Yu.K. Effect of oxide additives on up-conversion luminescence of erbium ions in alkaline germanate glasses. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 6, pp. 980–986 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-980-986

### Abstract

The effect of additives in sodium germanate glass on the up-conversion luminescence of an erbium ion was studied. Samples of glasses were prepared by high-temperature synthesis in corundum crucible. Synthesis temperature was 1250 °C. Synthesized glass had a composition of 58,95GeO<sub>2</sub>–27,79Na<sub>2</sub>O–8,67Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–4,34LaO–0,25Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mol% with additives of 5 mol% of the following oxides: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, SiO<sub>2</sub>, BaO, TiO<sub>2</sub>, PbO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO. Up-conversion luminescence spectra were recorded in

the wavelength range from 450 to 700 nm when excited by a semiconductor laser at 975 nm. Three bands were identified on the luminescence spectra corresponding to radiative transitions of the erbium ion  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  with maximum of about 520 nm;  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  with maximum of 550 nm and  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  with maximum of 670 nm. The luminescent properties of the glass with additives were compared to those of the initial glass. The effect of additives on the relative intensity redistribution of up-conversion luminescence was shown. Compared to the red luminescence band ( ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ), the green band ( ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ) intensity is a maximum for glass with the addition of phosphorus oxide; glass with the addition of lead oxide has the minimum intensity. The obtained dependence of the relative intensities of the up-conversion luminescence bands on the glass composition can find practical application in the development of optical luminescent sensors, as well as up-converters for solar cells.

#### Keywords

up-conversion luminescence, germanate glasses, erbium

#### Acknowledgements

The reported study was funded by the RFBR and BRFR, project number 18-58-00043 BEL\_a.

### Введение

Последние достижения в сфере оптических технологий привели к необходимости изучения потенциально перспективных материалов, которые в будущем могут быть использованы для таких областей науки и техники, как биомедицина, солнечная энергетика, лазерные и космические технологии и многое другое [1–5]. Многие исследования, проводимые с целью поиска оптических материалов с необходимыми для конкретной задачи характеристиками, были посвящены изучению люминесцентных свойств различных стекол, легированных редкоземельными ионами. Редкоземельные материалы используются для создания активного тела лазеров, светоизлучающих диодов, видеодисплеев [6]. К другим приложениям редкоземельных элементов относятся люминофоры, преобразователи излучения, оптические термодатчики, волоконные усилители [7–9]. Такое разнообразие применений данных материалов привело к увеличению числа научных работ, посвященных изучению составов и структуры стекол, кристаллов и стеклокерамик, содержащих редкие земли.

Традиционно ионы эрбия применялись в лазерах и волоконных усилителях для третьего телекоммуникационного окна [9]. При исследовании таких материалов было отмечено появление антистоксовской люминесценции иона эрбия (ап-конверсии) [10] при относительно высоких мощностях поглощенной накачки. Для получения таких уровней накачки можно использовать дополнительную соактивацию ионами иттербия, так как между эрбием и иттербием осуществляется эффективный перенос энергии возбуждения (до 95 %) [11]. Ап-конверсионная люминесценция представлена полосами с максимумами в зеленой и красной области, и она обусловлена различными механизмами: поглощение из возбужденного состояния и взаимодействие двух ионов в возбужденном состоянии [12]. Эффективность таких процессов зависит от расстояния между ионами, плотности мощности возбуждающего излучения, а также свойств матрицы, например, энергии фонона. Среди оксидных стекол одними из наиболее низкофононных являются германатные стекла [13]. Данные стекла обладают высокими эксплуатационными свойствами, также существует отработанная технология вытяжки волокон из таких стекол. Введение в матрицу стекла различных добавок (например, оксида алюминия, приводит к изменению локального окружения ионов эрбия, что в свою очередь проявляется на спектрах ап-конверсионной люминесценции. Для применения стекол в качестве активной среды для температурных датчиков, основанных на перераспределении интенсивности по термически связным уровням, важно, чтобы интенсивность зеленой люминесценции была максимальной. В солнечной энергетике для задач конверсии света из инфракрасной области в видимую, красная люминесценция является более предпочтительной. Поэтому исследование влияния химического состава стекла на спектры ап-конверсионной люминесценции является актуальной задачей. В данной работе была исследована зависимость интенсивности ап-конверсионной люминесценции от добавок в натриево-германатное стекло.

### Образцы и методика измерения

Для исследования влияния химического состава на спектрально-люминесцентные свойства германатного иттербий-эрбиевого стекла были синтезированы образцы общего состава с восьмью различными добавками (таблица). Для синтеза использовали шихту на основе карбонатов и оксидов необходимых элементов с условием чистоты «ХЧ» или «ОСЧ». Фосфорный ангидрид вводился в виде метафосфата натрия. В первую очередь шихта загружалась в корундовые тигли при комнатной температуре и 1 ч прогревалась на крышке силитовой печи (1200 °С). Затем тигли на 10 мин погружались в жаровое пространство на подъеме температуры до образования равномерного расплава (до 1250 °С). Осветление стекла происходило в течение 40 мин при температуре 1350 °С. После этого тигли доставали из печи и остужали при комнатной температуре, далее при температуре 480 °С проводился отжиг извлеченного стекла.

Все введенные добавки можно разделить на три группы: оксиды бария, магния и свинца являются модификаторами для германатной сетки, оксиды фосфора и кремния представляют собой дополнительные стеклообразователи, а оксиды алюминия, титана и ниобия это псевдостеклообразователи. Введение различных добавок позволяет изменять структуру германатной матрицы, а следовательно, и локальное окружение

иона  $\text{Er}^{3+}$ . Изучая серию образцов с различными добавками можно проследить зависимости влияния химического состава стекла на ап-конверсионную люминесценцию иона-активатора.

Таблица. Составы исследуемых стекол, мол%

	GeO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	PbO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
Glass0	58,95	27,79	8,67	4,34	0,25								
BaO	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24	5							
PbO	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24		5						
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24			5					
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24				5				
SiO <sub>2</sub>	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24					5			
MgO	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24						5		
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24							5	
TiO <sub>2</sub>	56,15	26,47	8,26	4,13	0,24								5

Спектры ап-конверсионной люминесценции были измерены с помощью специально собранной экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 1. Излучение непрерывного полупроводникового лазера 1 (длина волны накачки 975 нм) проходило через модулятор 2 (частота повторения импульсов 20 Гц), после чего попадало на образец 3, преобразованное излучение линзой 4 фокусировалось на щели монохроматора 5 (Acton-300), а затем попадало на приемник типа ФЭУ 6 (hamamatsu R928), полученные сигналы усиливались и обрабатывались при помощи цифрового синхронного усилителя 7 (модель SR850 фирмы «Stanford Research Systems»), далее данные попадали на компьютер 8.

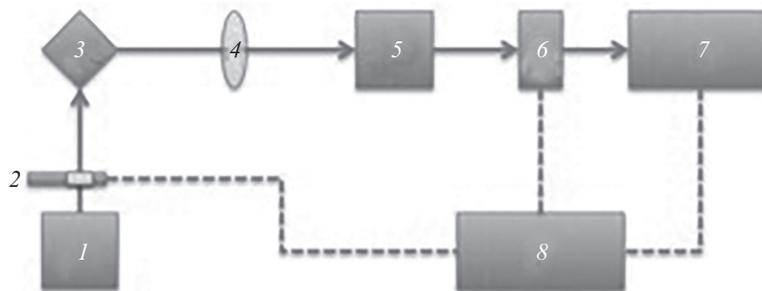


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Спектры измерялись в видимом диапазоне длин волн 450–750 нм с шагом 0,1 нм. Все измерения проводились при комнатной температуре. Полученные спектры нормировались по отношению к величине на длине волн около 670 нм. Обработка данных производилась в программе OriginPro.

### Результаты измерений

Энергетическая схема процесса ап-конверсионной люминесценции иона эрбия приведена на рис. 2.

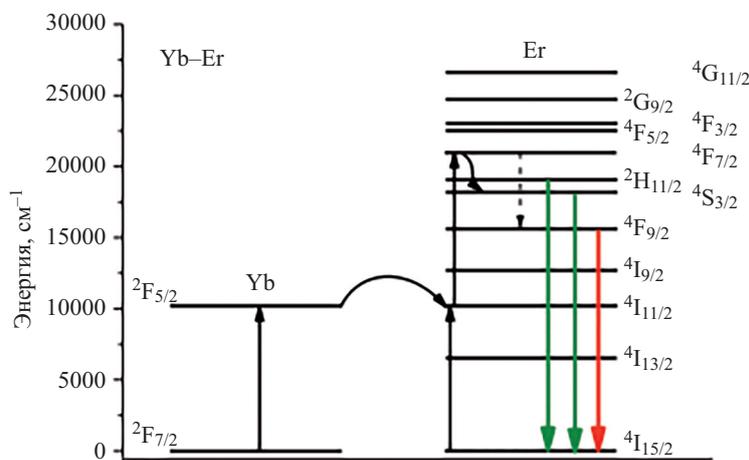


Рис. 2. Схема энергетических уровней  $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$

Излучение накачки с длиной волны 970 нм поглощается ионами иттербия на уровень  $^2F_{5/2}$  и безызлучательно переносится на эрбий (уровень  $^4I_{9/2}$ ). Ап-конверсионное преобразование представляет собой комбинацию таких процессов, как возбуждение иона эрбия посредством поглощения возбуждающего излучения из основного и возбужденного состояний, прямая и обратная передача энергии между взаимодействующими ионами, релаксация при излучательном переходе в основное состояние, безызлучательная внутрицентровая релаксация и миграция по ионам одного типа. Это приводит к заселению короткоживущего уровня  $^4F_{7/2}$ , возбуждение с которого безызлучательно релаксирует на уровень  $^4S_{3/2}$ . С данного уровня возможна дальнейшая безызлучательная релаксация на уровень  $^4F_{9/2}$ , прямой излучательный переход на основной уровень, а также за счет энергии фонона переход на верхний уровень  $^2H_{11/2}$ . По описанной схеме возможно получение трех полос люминесценции иона эрбия — две зеленые полосы (переходы  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ) и красная полоса (переход  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ). Вероятности переходов (как излучательных, так и безызлучательных) зависят от поля лигандов, окружающих ионов, т. е. от состава стекла.

Рассмотрим спектр люминесценции исходного стекла (рис. 3).

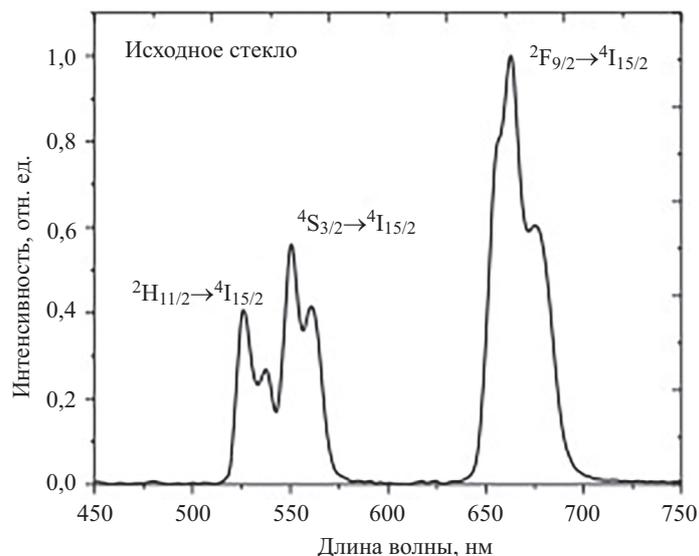


Рис. 3. Спектр люминесценции исходного стекла состава  $58,95\text{GeO}_2-27,79\text{Na}_2\text{O}-8,67\text{Yb}_2\text{O}_3-4,34\text{LaO}-0,25\text{Er}_2\text{O}_3$  мол%

В видимой области спектра стекла с ионами эрбия можно выделить три основные полосы с максимумом на длине волны 670 нм — соответствует переходу  $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ; около 550 нм — переходу  $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ ; около 670 нм — переходу  $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ . Рассмотрим влияния различных групп добавок на перераспределение интенсивности в этих трех полосах. Из стекол с добавлением модификаторов к наибольшим изменениям спектра приводит введение оксида свинца. На рис. 4 представлено сравнение спектров исходного стекла и стекла с добавлением  $\text{PbO}$ .

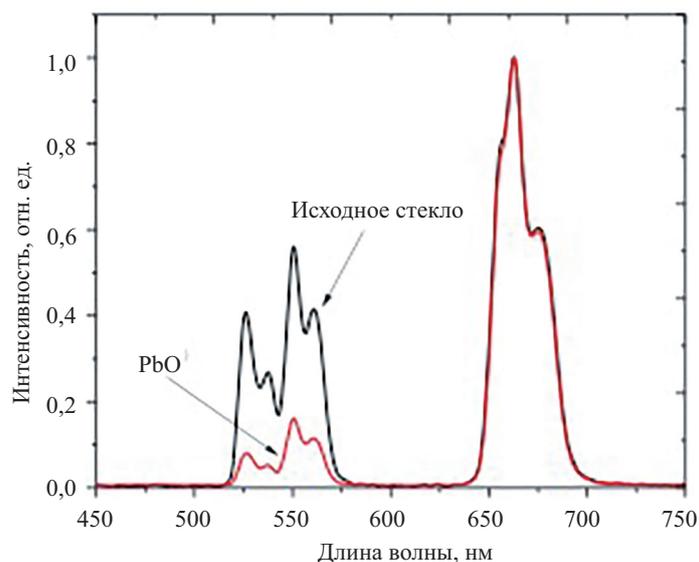


Рис. 4. Сравнение спектров люминесценции исходного стекла и стекла с добавлением  $\text{PbO}$

Из рис. 4 видно, что интенсивность обеих полос в зеленой области спектра (520–570 нм) сильно уменьшилась относительно полосы в красной области (670 нм), однако сохранилась пропорциональность интенсивностей (наибольшую интенсивность имеет полоса, соответствующая переходу  ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ , а наименьшую — переходу  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ ).

Из стеклообразователей наибольшие изменения спектра вызвало добавление оксида фосфора. Сравнение с исходным стеклом представлено на рис. 5.

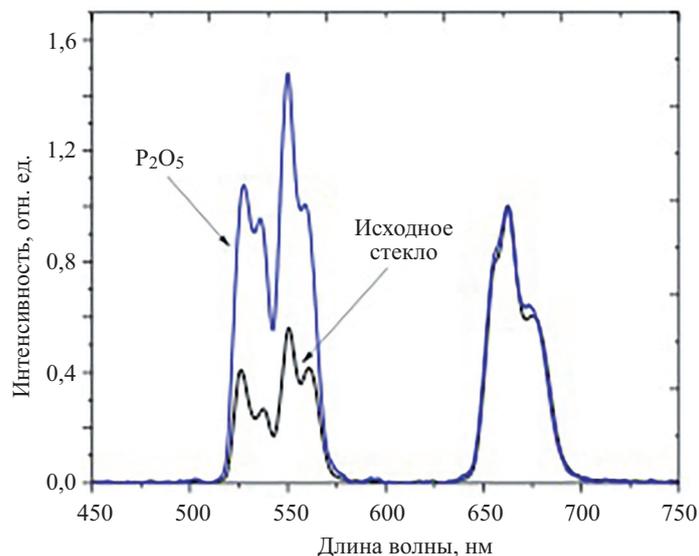


Рис. 5. Сравнение спектров люминесценции исходного стекла и стекла с добавлением  $P_2O_5$

Из графиков на рис. 5 видно, что введение оксида фосфора приводит к значительному перераспределению интенсивности в спектре. Значения интенсивности обеих зеленых полос относительно красной сильно возрастают, наиболее интенсивной становится полоса с максимумом на длине волны 550 нм, а наименее — с максимумом на длине волны 670 нм.

Для ряда образцов с добавлением псевдостеклообразователей максимально влияет на спектр введение оксида алюминия (рис. 6).

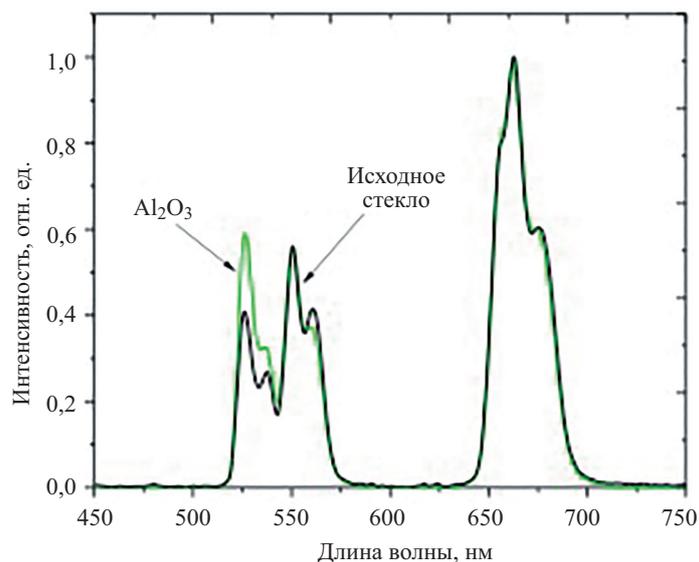


Рис. 6. Сравнение спектров люминесценции исходного стекла и стекла с добавлением  $Al_2O_3$

Как видно из рис. 6, для данного образца интенсивность зеленых полос меньше, чем красной, как и для исходного стекла, однако происходит перераспределение интенсивности между зелеными полосами, в результате чего интенсивность полосы, соответствующей переходу  ${}^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  — становится больше, чем полосы, соответствующей переходу  ${}^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ . Для данного образца наибольшей интенсивностью обладает красная полоса, а наименьшей — более длинноволновая зеленая полоса.

## Заключение

Изучено влияние добавок различных оксидов в натриево-германатное стекло на ап-конверсионные спектры люминесценции иона эрбия. Показано, что путем модификации локального окружения иона эрбия можно изменять относительные интенсивности полос ап-конверсионной люминесценции. Добавление оксида свинца в исходное стекло приводит к значительному уменьшению интенсивности обеих зеленых полос относительно красной. Оксид фосфора — напротив, ведет к увеличению интенсивности зеленых полос относительно красной. Также введение псевдостеклообразователя — оксида алюминия — перераспределяет интенсивность полос на длинах волн 520 и 550 нм друг относительно друга.

## Литература

1. Mikami M., Watanabe H., Uheda K., Shimooka S., Shimomura Y., Kurushima T., Kijima N. New phosphors for white LEDs: Material design concepts // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2009. V. 1. N 1. P. 1–10. doi: 10.1088/1757-8981/1/1/012002
2. Афанасьев В.П., Васильев В.Н., Игнат'ев А.И., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А. Новые люминесцентные стекла и стеклокерамики и перспективы их использования в солнечной энергетике // *Оптический журнал*. 2013. Т. 80. № 10. С. 69–79.
3. Mohapatra M., Naik Y.P., Natarajan V., Seshagiri T.K., Singh Z., Godbole S.V. Rare earth doped lithium titanate (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>) for potential phosphor applications // *Journal of Luminescence*, 2010. V. 130. N 12. P. 2402–2406. doi: 10.1016/j.jlumin.2010.08.001
4. Rao R.P. Preparation and characterization of fine-grain yttrium-based phosphors by sol-gel process // *Journal of the Electrochemical Society*, 1996. V. 143. N 1. P. 189–197. doi: 10.1149/1.1836407
5. Zhao Y., Shu C. Multi-wavelength lasing oscillation of a Vernier-type unidirectional Er<sup>3+</sup>-doped fiber compound ring // *Applied Physics Letters*, 1997. V. 70. N 25. P. 3344–3346. doi: 10.1063/1.119165
6. Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. *Industrial minerals & rocks: Commodities, markets, and uses*. Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. P. 769–792.
7. Duarte F.J. *Tunable laser applications*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009. 480 p.
8. Wang X., Liu Q., Bu Y., Liu C.-S., Liu T., Yan X. Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors // *RSC Advances*, 2015. V. 5. N 105. P. 86219–86236. doi: 10.1039/c5ra16986k
9. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*. New York: Wiley, 1994. 800 p.
10. Овсянкин В.В., Феofilов П.П. Кооперативная сенсibilизация люминесценции галоидо-серебряных солей и спектральная сенсibilизация фотографических эмульсий // *Доклады АН СССР*. 1967. Т. 174. № 4. С. 787–790.
11. Lunter S.G., Fyodorov Yu.K. Development of erbium laser glasses // *Proc. of F. Simp. Light materials, Laser Technology material for Optic Telecomm.*, 1994. V. 2. P. 327–333.
12. Auzel F. Upconversion processes in coupled ion systems // *Journal of Luminescence*, 1990. V. 45. N 1-6. P. 341–345. doi: 10.1016/0022-2313(90)90189-I
13. Немиллов С.В. Оптическое материаловедение: Термодинамические и релаксационные свойства стеклообразующих расплавов и стекол: Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 132 с.

## Авторы

**Кузьменко Наталья Константиновна** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-7213-82-31, Nataliakuz01@yandex.ru  
**Асеев Владимир Анатольевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7004254881, ORCID ID: 0000-0003-4098-2136, aseev@oi.ifmo.ru

## References

1. Mikami M., Watanabe H., Uheda K., Shimooka S., Shimomura Y., Kurushima T., Kijima N. New phosphors for white LEDs: Material design concepts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 1–10. doi: 10.1088/1757-8981/1/1/012002
2. Afanas'ev V.P., Vasil'ev V.N., Ignat'ev A.I., Kolobkova E.V., Nikonov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A. New luminescent glasses and prospects of using them in solar energy. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no. 10, pp. 635–641. doi: 10.1364/JOT.80.000635
3. Mohapatra M., Naik Y.P., Natarajan V., Seshagiri T.K., Singh Z., Godbole S.V. Rare earth doped lithium titanate (Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>) for potential phosphor applications. *Journal of Luminescence*, 2010, vol. 130, no. 12, pp. 2402–2406. doi: 10.1016/j.jlumin.2010.08.001
4. Rao R.P. Preparation and characterization of fine-grain yttrium-based phosphors by sol-gel process. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, vol. 143, no. 1, pp. 189–197. doi: 10.1149/1.1836407
5. Zhao Y., Shu C. Multi-wavelength lasing oscillation of a Vernier-type unidirectional Er<sup>3+</sup>-doped fiber compound ring. *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 70, no. 25, pp. 3344–3346. doi: 10.1063/1.119165
6. Kogel J.E., Trivedi N.C., Barker J.M., Krukowski S.T. *Industrial minerals & rocks: commodities, markets, and uses*. Littleton, CO, USA, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006. P. 769–792.
7. Duarte F.J. *Tunable laser applications*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009, 480 p.
8. Wang X., Liu Q., Bu Y., Liu C.-S., Liu T., Yan X. Optical temperature sensing of rare-earth ion doped phosphors. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 105, pp. 86219–86236. doi: 10.1039/c5ra16986k
9. Desurvire E. *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*. New York, Wiley, 1994, 800 p.
10. Ovsyankin V.V., Feofilov P.P. Cooperative sensibilization of luminescence in silver halide salts and spectral sensibilization of photographic emulsions. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1967, vol. 174, no. 4, pp. 787–790. (in Russian)
11. Lunter S.G., Fyodorov Yu.K., Development of erbium laser glasses. *Proc. of F. Simp. Light materials, Laser Technology material for Optic Telecomm.*, 1994, vol. 2, pp. 327–333.
12. Auzel F. Upconversion processes in coupled ion systems. *Journal of Luminescence*, 1990, vol. 45, no. 1-6, pp. 341–345. doi: 10.1016/0022-2313(90)90189-I
13. Nemilov S.V. *Optical material science: Thermodynamic and relaxation properties of vitreous melts and glasses*: Tutorial. St. Petersburg, NRU ITMO, 2014, 132 p. (in Russian)

## Authors

**Natalia K. Kuzmenko** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-7213-82-31, Nataliakuz01@yandex.ru  
**Vladimir A. Aseev** — PhD, Associate Professor, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7004254881, ORCID ID: 0000-0003-4098-2136, aseev@oi.ifmo.ru

**Ходасевич Михаил Александрович** — кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт физики НАН Беларуси, Минск, 220072, Республика Беларусь, Scopus ID: 6601976258, ORCID ID: 0000-0002-8363-6009, m.khodasevich@ifanbel.bas-net.by

**Фёдоров Юрий Кузьмич** — кандидат технических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 7102476099, ORCID ID: 0000-0001-6797-2005, Fyuri5977@gmail.com

**Mikhail A. Khodasevich** — PhD, Associate Professor, Senior Scientific Researcher, B.I. Stepanov Institute of Physics, Minsk, 220072, Republic of Belarus, Scopus ID: 6601976258, ORCID ID: 0000-0002-8363-6009, m.khodasevich@ifanbel.bas-net.by

**Yuri K. Fedorov** — PhD, Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 7102476099, ORCID ID: 0000-0001-6797-2005, Fyuri5977@gmail.com