

УДК 535.6

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ЛЮМИНОФОРЫ В СТЕКЛЕ НА ОСНОВЕ СВИНЦОВО-СИЛИКАТНЫХ СТЕКОЛ

В.А. Асеев^а, А.Ю. Биби^а, Е.В. Колобкова^а, Я.А. Некрасова^а, Н.В. Никоноров^а, А.Е. Романов^б,
Ю.В. Тузова^а, М.А. Швалева^а

^а Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, Anastasiya.bibik@list.ru

^б Тартуский университет, 50090, Тарту, Эстония

Аннотация. Разработан и синтезирован люминесцирующий композит типа «люминофор в стекле» на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы и мелкодисперсного порошка кристалла алюмо-иттриевого граната, активированного церием. В качестве стеклообразной матрицы была выбрана свинцово-силикатная система $(40\text{SiO}_2-20\text{PbO}-(40-x)\text{PbF}_2-x\text{AlF}_3, x=25,15,10,5,0)$. Для получения композита «люминофор в стекле» исходное стекло измельчалось до порошкообразного состояния (фритта) с размером частицы порядка 50 мкм и затем смешивалось с порошком коммерческого люминофора АИГ:Ce³⁺ в соотношении 30:70. Получившаяся смесь запрессовывалась в форму под давлением и спекалась на подложке из кварцевого стекла в течение 30 мин при температуре 823 К. Таким образом, была получена плоскопараллельная пластинка композита «люминофор в стекле» диаметром 10 мм. Произведена оптимизация состава стекла с целью снижения потерь света при рассеянии на границе раздела стекло-люминофор путем подбора показателя преломления. Проведены рентгенофазовые и спектрально-люминесцентные исследования полученного композита. На основании результатов данных исследований показано, что при спекании не происходит деградации порошка YAG:Ce. Исследована зависимость интенсивности люминесценции от температуры в диапазоне от комнатной температуры до 473 К. Показано, что использование люминофора в стекле снижает температурное тушение люминесценции по сравнению с силиконом. С использованием композита «люминофор в стекле» на основе свинцово-силикатных стекол с низкой температурой стеклования создан макет белого светодиода. Получившийся светодиод излучает белый свет с цветовой температурой 4370 К, световая отдача составляет 58 лм/Вт. Разработанный композит может быть использован для производства мощных светодиодов белого света.

Ключевые слова: люминофор в стекле, свинцово-силикатное стекло, алюмо-иттриевый гранат с церием, спектры люминесценции, световая отдача, белые светодиоды.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке, выделяемой на реализацию программы развития международных научных лабораторий Университета ИТМО в соответствии с пунктом «Правил распределения и предоставления субсидий на государственную поддержку ведущих университетов Российской Федерации в целях повышения их конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров».

INORGANIC PHOSPHORS IN GLASS BASED ON LEAD SILICATE GLASSES

V.A. Aseev^a, A.Yu. Bibik^a, E.V. Kolobkova^a, Ya. A. Nekrasova^a, N.V. Nikonorov^a, A.E. Romanov^b,
Ju.V. Tuzova^a, M.A. Shvaleva^a

^a ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Anastasiya.bibik@list.ru

^b University of Tartu, 50090, Tartu, Estonia

Abstract. We created and synthesized luminescent composite of the "phosphor in glass" type, based on the lead-silicate matrix and fine-dispersed powder of cerium-activated yttrium-aluminum garnet crystal. Lead-silicate system $(40\text{SiO}_2-20\text{PbO}-(40-x)\text{PbF}_2-x\text{AlF}_3, x = 0-25)$ was chosen as the glassy matrix. Initial glass was reduced to powder (frit) for "phosphor in glass" composite with a particle size about 50 μm . Glass frit and powder of commercial YAG:Ce³⁺ phosphor were mixed in a ratio of 30 to 70 (wt %). Then this composite was pressed in a tablet and sintered on a quartz substrate at 823 K for 30 minutes. Thus, the plane parallel sheet for composite of the "phosphor in glass" was obtained with a diameter equal to 10 mm. For the purpose to reduce the loss of light in the presence of dispersion at a glass-phosphor boundary, optimization of glass mixture was done by adjusting the refractive index. X-ray phase and spectral-luminescent analysis of the derived composite were done. The results of these studies showed that there was no degradation of YAG:Ce powder during sintering. Dependence of luminescence intensity from temperature in the range from room temperature to 473 K was studied. It was shown, that with the phosphor in glass usage thermal quenching of luminescence was reduced in comparison with the silicone. The model of white LED was created with the "phosphor in glass" composite based on lead-silicate glasses with low temperature of vitrifying. The derived LED emits white light with a color temperature of 4370 K, and the luminous efficiency is equal to 58 lm/W. The developed luminescent composite based on the lead-silicate matrix can be used for the production of high-power white light LED.

Keywords: phosphor in glass, lead silicate glass, yttrium-aluminum garnet doped with cerium, luminescence spectra, luminous efficiency, white LEDs.

Acknowledgements. The work was partially financially supported by the state program for development of international scientific laboratories at ITMO University according to "Rules of grants distribution for the Russian Federation Government financial support of the leading universities aimed at their competitiveness growth among the chief world scientific educational centers".

Введение

К настоящему времени одним из традиционных методов получения светодиодов белого свечения является использование комбинации синего светодиода на основе кристалла InGaN с зелено-желтым люминофором. В зависимости от соотношения зеленых и желтых полос люминесценции, возбуждаемых синим излучением кристалла, возможно получение белого света различной цветовой температуры. Сего-

дня коммерческие люминофоры представляют собой мелкодисперсные порошки кристалла алюмоиттриевого граната, активированного трехвалентным церием (АИГ:Ce³⁺). Этот порошок получают методом твердотельной реакции между оксидами иттрия, алюминия и церия. Для фиксации люминесцентного порошка на поверхности кристалла светодиода его смешивают с жидким полимером – оптическим силиконом, который играет роль буферного связующего материала, и такой композит «люминофор в полимере» наносят на поверхность светоизлучающего кристалла нитрида индия. После затвердевания композита на него наносится линза, формирующая диаграмму направленности белого излучения. Несмотря на простоту технологии получения композита «люминофор в полимере» и нанесения его на поверхность кристалла, а также сравнительно невысокую стоимость, такой подход имеет серьезные недостатки, которые, прежде всего, проявляются в процессе эксплуатации белого светодиода. Так, например, в процессе эксплуатации композит «люминофор в полимере» подвергается длительному воздействию синего излучения кристалла нитрида индия, а также нагревается до значительных температур (более 423 К). В результате этого силикон изменяет свои свойства: появляются центры окраски, дефекты и деформация, которые снижают коэффициент полезного действия светодиода. Еще одним из недостатков является высокий уровень рассеяния композита, которое возникает на границе раздела фаз полимер–кристалл, поскольку показатель преломления кристалла АИГ:Ce³⁺ составляет 1,83, а полимера 1,54 [1]. В научно-информационных источниках были опубликованы данные, по которым одним из самых лучших показателей преломления люминофоров для использования в светодиодной промышленности является значение показателя, большее 1,4 [2–6]. Значительная разница между показателями преломления приводит к высокому рассеянию, что ухудшает излучательные характеристики светодиода.

Для решения указанной проблемы в работах [7–9] были изучены различные связующие неорганические материалы, которые имеют высокую термическую устойчивость по сравнению с полимерными материалами. Для дальнейшего повышения эффективности белых светодиодов необходим неорганический материал, например, стекло, у которого термическая и оптическая прочности могут в несколько раз превышать аналогичные характеристики для органических материалов. Более того, изменение состава стекла позволяет изменять показатель преломления в широких пределах, приближая его к показателю преломления кристалла АИГ:Ce³⁺, и, таким образом, снижать светорассеяние в композите. В научно-информационных источниках в качестве матриц для люминофоров упоминаются следующие виды стекол: P₂O₅-MgO-CaO-SrO-BaO-Dy-Tm [10], SiO₂-Na₂O₃-Al₂O₃-CaO [11], SiO₂-B₂O₃-RO (R = Ba, Zn) [10], SnO-ZnO-P₂O₅ [12], SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃-ZnO-Li₂O-BaO [13]. Еще один пример использования стекла продемонстрирован в работе [14], в которой было показано, что в качестве связующего буферного слоя с порошком АИГ:Ce³⁺ может служить силикатное стекло. В этом случае композит «люминофор в стекле» (или, в англоязычной версии, Phosphor-in-Glass, PiG) получается при смешивании двух мелкодисперсных порошков стекла и люминофора АИГ:Ce³⁺ с последующим их спеканием. В основном в качестве исходных стекол для фритты используют свинцово-силикатные стекла. Так, в работе [15] показана реализация PiG на стеклах и проведены испытания светодиодов на их основе. В работе [16] показано, что такая замена приводит к увеличению выхода люминесценции по сравнению с традиционным силиконом на 7%. К сожалению, на сегодняшний день публикации в этом направлении практически нет.

Целью настоящей работы была разработка композита «люминофор в стекле» на основе высокопреломляющих свинцово-силикатных стекол (40SiO₂-20PbO-(40-x)PbF₂-xAlF₃) с низкой температурой стеклования для мощных белых светодиодных матриц.

Экспериментальная часть

В качестве стеклообразной матрицы была выбрана свинцово-силикатная система (40SiO₂-20PbO-(40-x)PbF₂-xAlF₃, x = 25, 15, 10, 5, 0). Варьирование концентраций фторидов свинца и алюминия позволяет изменять показатель преломления исходного стекла в широких пределах, в результате можно добиться полного совпадения показателей преломления кристаллического люминофора АИГ:Ce³⁺ и матрицы стекла для снижения потерь света на границе раздела люминофор–стекло. Также введение фторидов свинца снижает температуру стеклования, что позволяет снизить температуру спекания образцов для предотвращения взаимодействия компонентов и сохранения кристаллической фазы люминофора. Методом дифференциального термического анализа был определен диапазон температур стеклования для стекол такой системы – от 593 К до 678 К. Температура синтеза стекол, активированных фторидами редкоземельных элементов, составляла 1173 К. Время синтеза – 30 мин. Варка стекол в открытых корундовых тиглях в атмосфере воздуха обеспечивала хорошие показатели качества стекла (в первую очередь прозрачность) и соответствовала окислительным условиям. Очевидно, что химический состав по синтезу не соответствовал конечному составу стекла, так как в процессе варки осуществлялось значительное улетучивание фтора преимущественно в форме тетрафторида кремния SiF₄. Для свинцовофторосиликатных стекол было проанализировано влияние содержания фторидов на изменение некоторых физических свойств. Увеличение общего содержания фторидов в стекле производилось путем замещения оксида свинца PbO на фторид свинца PbF₂. Непосредственно после выработки стекла подвергались отжигу в муфельной печи.

Для создания экспериментальных образцов было выбрано стекло синтезированной серии, обладающее наиболее близким составом к требуемому. Стекло содержит 15% AlF_3 , 45% PbF_2+PbO и обладает температурой стеклования 663 К.

Для получения композита «люминофор в стекле» исходное стекло измельчалось до порошкообразного состояния (фритта) с размером частицы порядка 50 мкм и затем смешивалось с порошком коммерческого люминофора АИГ: Ce^{3+} в соотношении 30:70. Такое соотношение было выбрано исходя из состава стандартных смесей люминофора с оптическим силиконом для белых светодиодов. Получившаяся смесь запрессовывалась в форму под давлением и спекалась на подложке из кварцевого стекла в течение 30 мин при температуре 823 К. Таким образом, была получена плоскопараллельная пластинка композита «люминофор в стекле» диаметром 10 мм.

Рентгенофазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре «Rigaku UltimaIV» – дифрактометр общего назначения типа ДРОН с использованием CuK_α -излучения. Напряжение на трубке составляло 40 кВ, ток трубки 40 мА, общая выходная мощность 1,6 кВт. Применялась фокусировка лучей по методу Брэгга–Брентано. Измерения производились со скоростью 1 °/мин. Спектры возбуждения и люминесценции записывались на спектрофлуориметре Perkin-ElmerLS-50b в диапазоне 400–550 нм и 550–700 нм с шагом 0,5 нм и скоростью сканирования 60 нм/мин.

Для исследования температурной зависимости люминесценции использовалась печь замкнутого объема, в которую помещался образец. Температура внутри печи задавалась цифровым контроллером и отслеживалась с помощью термодатчика. Градиент температуры по объему печи не превышал 1 К. Люминесценция возбуждалась лазером ($\lambda=457$ нм) и регистрировалась при помощи монохроматора (Acton Research 300) и фотоэлектронного умножителя (Hamamatsu R928).

Запись интегральных спектров люминесценции люминофора и излучения диода проводилась при возбуждении синим диодом (модель X10 фирмы Оптоган) с максимумом длины волны 456 нм. Для этого на синий светодиод помещались пластинки люминофора, и в интегрирующей сфере диаметром 50 мм производилась регистрация суммарного спектра диода и желтого люминофора при помощи программно-аппаратного комплекса, состоящего из спектрометра и программного обеспечения (ПО) SpectraWiz фирмы StellarNet.

Световая отдача светодиодного модуля, состоящего из синтезируемого люминофора и синего светодиода X10, измерялась на оптической сфере Gamma Scientific с использованием программы SpectralSuite 3.0. Для этого полученный светодиодный модуль помещали в сферу, и при регистрации спектров люминесценции считалась световая отдача.

Результаты и обсуждение

Замещение фторида свинца на фторид алюминия позволяет плавно варьировать показатель преломления (рис. 1). Это связано с более высокой удельной рефракцией ионов свинца по сравнению с ионами алюминия.

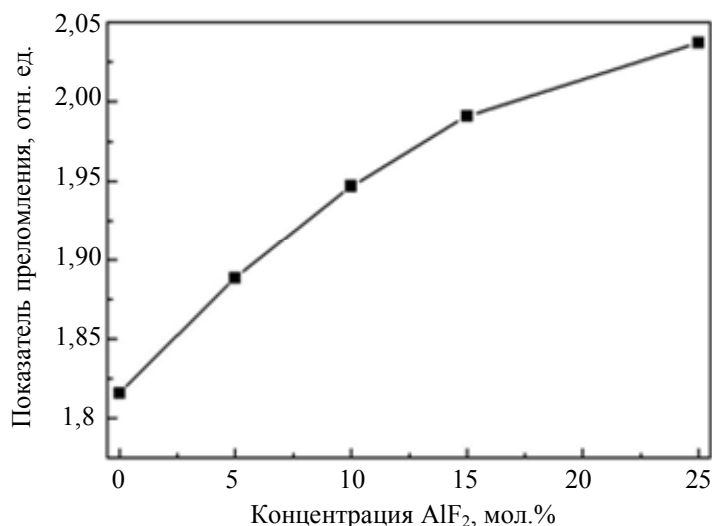


Рис. 1. Зависимость показателя преломления стекла от содержания AlF_2

Из рис. 1 видно, что увеличение количества фторида алюминия приводит к росту показателя преломления от 1,82 до 2,08. Изменяя соотношение алюминий–свинец, можно добиться полного совпадения показателей преломления кристаллического люминофора АИГ: Ce^{3+} и матрицы стекла. В нашем случае показатель преломления стекла 1,83, совпадающий с показателем преломления АИГ: Ce^{3+} , достигается при содержании фторида алюминия порядка 5 мол. %.

Одним из требований, предъявляемых к стеклянной фритте, является отсутствие взаимодействия с порошком кристаллического люминофора АИГ:Ce³⁺ при спекании. Это связано с тем, что широкая полоса люминесценции церия в желто-зеленой области принадлежит переходу $5d-4f$, и ее интенсивность сильно зависит от окружающей структуры. Церий, находящийся в структуре граната (Y₃Al₅O₁₂), обладает одной из наиболее эффективных полос люминесценции, и модификация структуры граната приводит к уменьшению интенсивности люминесценции. Чтобы выяснить, не нарушается ли при взаимодействии кристаллическая структура граната, образец композита «люминофор в стекле» был исследован методом рентгенофазового анализа. Для сравнения был добавлен спектр исходного порошка АИГ:Ce³⁺ (рис. 2).

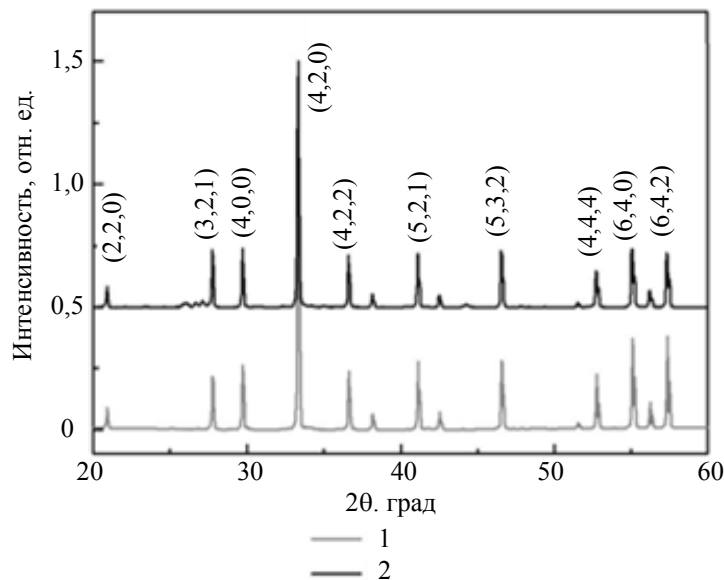


Рис. 2. Рентгенограмма порошка кристалла Y₃Al₅O₁₂:Ce (1) и композита «люминофор в стекле» (2). В скобках обозначены индексы Миллера

На рентгенограмме видно, что положение пиков в любой матрице совпадает, что свидетельствует о присутствии одинаковой кристаллической фазы Y₃Al₅O₁₂. Разница же в интенсивности пиков свидетельствует о различном объеме кристаллической фазы в образцах.

Сравним спектры возбуждения (рис. 3, а) и люминесценции (рис. 3, б) исходного порошка кристалла АИГ:Ce³⁺ со спектрами АИГ:Ce³⁺ в различных матрицах – коммерческом силиконе и разработанном свинцово-силикатном стекле.

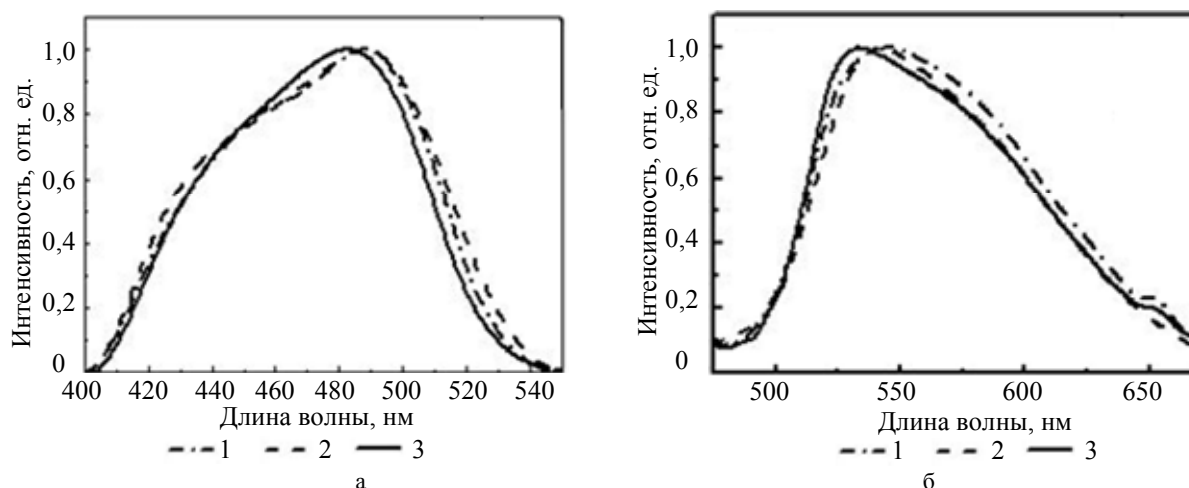


Рис. 3. Спектр возбуждения (а) и люминесценции (б): исходного порошка АИГ:Ce³⁺ (1); композита «люминофор в стекле» (2); «люминофор в полимере» (3)

На рис. 3 видно, что форма спектров практически не зависит от состава буферного связующего материала. Эти результаты также свидетельствуют о том, что значительного взаимодействия стекла и кристаллической фазы при спекании не происходит.

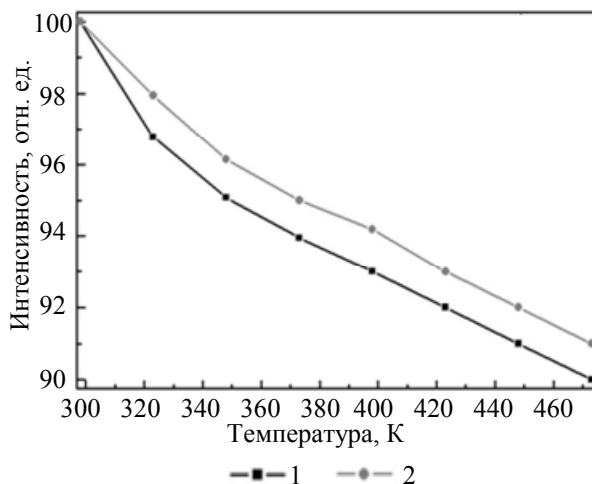


Рис. 4. Зависимость интенсивности люминесценции от температуры для «люминофора в силиконе» (1) и композита «люминофор в стекле» (2)

Рис. 4 отображает зависимость интенсивности люминесценции от температуры, которая менялась в диапазоне от комнатной температуры до 200°C. Интенсивность люминесценции Pr^{3+} для 473 К уменьшилась на 9%, а для $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ в полимере – на 10% относительно комнатной температуры. Ослабление температурного тушения для «люминофора в стекле» происходит за счет того, что матрица стекла обладает более высокой теплопроводностью (порядка 0,8 Вт/(м·К)), чем силикон (0,2 Вт/(м·К)). Это приводит к более равномерному распределению тепла по всей поверхности образца, что снижает локальный перегрев люминофора.

Следующим этапом работы явилось тестирование светодиода с композитом «люминофор в стекле». На рис. 5 показан интегральный спектр излучения, состоящий из синей полосы излучения кристалла InGaN и широкой полосы АИГ: Ce^{3+} в зелено-желтой области спектра. На основании интегрального спектра при помощи ПО SpectraWiz была определена цветовая температура, эффективность преобразования излучения из синего в желто-зеленое и световая отдача.

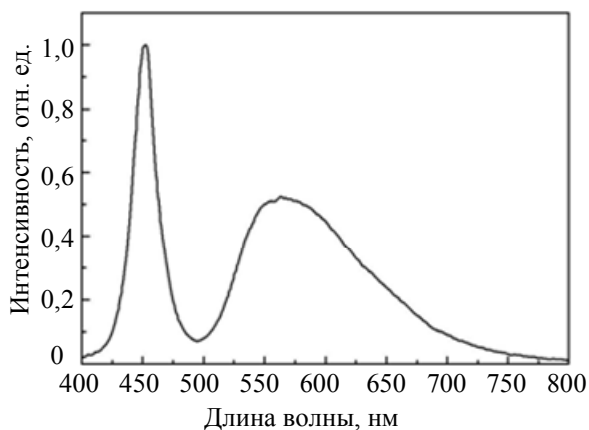


Рис. 5. Интегральный спектр излучения кристалла InGaN и композита «люминофор в стекле»

Получившийся светодиод излучает белый свет с цветовой температурой 4370 К, световая отдача составила 58 лм/Вт. Значения для традиционных светодиодов с силиконом – порядка 85 лм/Вт при соизмеримой цветовой температуре [7].

Заключение

Разработан композит «люминофор в стекле» на основе высокопреломляющей свинцово-силикатной матрицы для белых светодиодов. В исходном стекле оптимизировано соотношение оксидов и фторидов свинца и их суммарная концентрация (45 мол.%), с целью выравнивания показателя преломления стеклообразной матрицы и кристаллического порошка АИГ: Ce^{3+} для уменьшения светорассеяния на границе двух фаз «стекло–кристалл». На основе разработанного композита «люминофор в стекле» создан макет белого светодиода, обладающего значениями световой отдачи 58 лм/Вт и цветовой температуры 4370 К. Разработанный материал может быть использован в качестве люминофора для мощных светодиодов белого излучения.

Литература

1. Shin-Etsu Silicone. Product Information [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.silicone.jp/e/index.shtml>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 21.03.2014).
2. Zhao H., Liu G., Zhang J., Poplawsky J.D., Dierolf V., Tansu N. Approaches for high internal quantum efficiency green InGaN light emitting diodes with large overlap quantum wells // *Optics Express*. 2011. V. 19. N 14. P. A991–A1007.
3. Farrell R.M., Young E.C., Wu F., Denbaars S.P., Speck J.S. Materials and growth issues for high-performance nonpolar and semipolar light-emitting devices // *Semiconductor Science and Technology*. 2012. V. 27. N 2. Art. 024001.
4. Zhang J., Tansu N. Improvement in spontaneous emission rates for InGaN quantum wells on ternary InGaN substrate for light-emitting diodes // *Journal of Applied Physics*. 2011. V. 110. N 11. Art. 113110.
5. Ee Y.-K., Biser J.M., Cao W., Chan H.M., Vinci R.P., Tansu N. Metalorganic vapor phase epitaxy of III-nitride light-emitting diodes on nanopatterned AGOG sapphire substrate by abbreviated growth mode // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron*. 2009. V. 15. N 4. P. 1066–1072.
6. Li X.H., Song R., Ee Y.-K., Kumnorkaew P., Gilchrist J.F., Tansu N. Light extraction efficiency and radiation patterns of III-nitride light-emitting diodes with colloidal microlens arrays with various aspect ratios // *IEEE Photonics Journal*. 2011. V. 3. N 3. P. 489–499.
7. Tanabe S., Fujita S., Sakamoto A., Yamamoto S. Glass ceramics for solid state lighting // *Ceramic Transactions*. 2006. V. 173. P. 19–25.
8. Fujita S., Sakamoto A., Tanabe S. Luminescence characteristics of YAG glass-ceramic phosphor for white LED // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 2008. V. 14. P. 1387–1391.
9. Nishiura S., Tanabe S. Preparation and optical properties of Eu^{2+} and Sm^{3+} co-doped glass ceramic phosphors emitting white color by violet laser excitation // *Journal of the Ceramic Society of Japan*. 2008. V. 116. N 1358. P. 1096–1099.
10. Tsai C.-C., Cheng W.-C., Chang J.-K., Chen Y.-L., Chen J.-H., Hsu Y.-C., Cheng W.-H. Ultra-high thermal-stable glass phosphor layer for phosphor-converted white light-emitting diodes // *IEEE/OSA Journal of Display Technology*. 2013. V. 9. N 6. P. 427–432.
11. Tsvetkova M.N., Korsakov V.G., Sychev M.M., Chernovets B.V., Itkinson G.V. Study of photophosphors for white LEDs // *Journal of Optical Technology*. 2011. V. 78. N 6. P. 403–407.
12. Tsai C.-C., Chung C.-H., Wang J., Cheng W.-C., Chen M.-H., Liou J.-S., Chang J.-K., Hsu Y.-C., Huang S.-C., Lee C.-W., Hu H.-L., Huang S.B., Kuang J.-H., Cheng W.-H. High thermal stability of high-power phosphor based white-light-emitting diodes employing Ce:YAG-doped glass // *Proc. Electronic Components and Technology Conference*. 2010. P. 700–703.
13. Tsai C.-C., Liou J.-S., Cheng W.-C., Chung C.-H., Chen M.-H., Wang J., Cheng W.-H. High humidity resistance of high-power white-light-emitting diode modules employing Ce:YAG doped glass // *Proc. Electronic Components and Technology Conference*. 2011. P. 1626–1630.
14. Lee Y.K., Lee J.S., Heo J., Im W.B., Chung W.J. Phosphor in glasses with Pb-free silicate glass powders as robust color-converting materials for white LED applications // *Optics Letters*. 2012. V. 37. N 15. P. 3276–3278.
15. Allen S.C., Steckl A.J. A nearly ideal phosphor-converted white light-emitting diode // *Applied Physics Letters*. 2008. V. 92. N 14. Art. 143309.
16. Setlur A.A. Phosphors for LED-based solid-state lighting // *Electrochemical Society Interface*. 2009. V. 18. N 4. P. 32–36.

<i>Асеев Владимир Анатольевич</i>	– кандидат физико-математических наук, ассистент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, Aseev@oi.ifmo.ru
<i>Бибики Анастасия Юрьевна</i>	– студент, инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, Anastasiya.bibik@list.ru
<i>Колобкова Елена Вячеславовна</i>	– доктор химических наук, доцент, профессор, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; Kolobok106@rambler.ru
<i>Некрасова Яна Андреевна</i>	– аспирант, инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, Nekrasova@oi.ifmo.ru
<i>Никоноров Николай Валентинович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой, Университет ИТМО, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Nikonogov@oi.ifmo.ru
<i>Романов Алексей Евгеньевич</i>	– доктор физико-математических наук, приглашенный профессор, Тартуский Университет, 50090, Тарту, Эстония, Alexey.romanov@niuitmo.ru
<i>Тузова Юлия Вячеславовна</i>	– студент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, july2006624@gmail.com
<i>Швалева Мария Александровна</i>	– ассистент кафедры, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, Shvalevama@niuitmo.ru

- Vladimir A. Aseev* – PhD, assistant, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Aseev@oi.ifmo.ru
- Anastasiya Yu. Bibik* – student, engineer, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Anastasiya.bibik@list.ru
- Elena V. Kolobkova* – D.Sc., Associate professor, Professor, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Kolobok106@rambler.ru
- Yana A. Nekrasova* – postgraduate, engineer, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Nekrasova@oi.ifmo.ru
- Nikolai V. Nikonorov* – D.Sc., Professor, Department head, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Nikonorov@oi.ifmo.ru
- Alexey A. Romanov* – D.Sc., Visiting professor, University of Tartu, Tartu, 50090, Estonia, Alexey.romanov@niuitmo.ru
- Julia V. Tuzova* – student, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, july2006624@gmail.com
- Mariya A. Shvaleva* – assistant, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, Shvalevama@niuitmo.ru

Принято к печати 31.05.14
Accepted 31.05.14