

УДК 535.6

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ СВЕТОДИОДНЫХ
ЛЮМИНОФОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.С. Фудин^a, К.Д. Мынбаев^{a,b}, Х. Липсанен^{a,c}, К.Е. Айфантис^{a,d}, В.Е. Бугров^a, А.Е. Романов^{a,b}

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Karim.mynbaev@niuitmo.ru

^c Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия

^d Университет Аризоны, Таксон, 85721, Аризона, США

Аннотация. Для оценки перспектив применения люминофорных светодиодов в системах беспроводной передачи данных в оптическом диапазоне рассмотрены частотные характеристики современных светодиодных люминофорных материалов. Проведены измерения зависимости интенсивности излучения одиночных светодиодов и светодиодных сборок с люминофорами на основе иттрий-алюминиевого и лютеций-алюминиевого граната (в том числе с добавлением нитридного люминофора), а также силикатных люминофоров, от частоты электрических импульсов, возбуждающих излучение светодиодов. Показано, что с точки зрения скорости передачи информации люминофоры на основе гранатов (в том числе с добавлением нитридных люминофоров) имеют больший потенциал, чем силикатные люминофоры. Материалы на основе гранатов могут быть использованы в оптических системах передачи данных с полосой пропускания (без дополнительной модуляции) до 3 МГц (в одночиповых светодиодах) и до 4,5 МГц (в 9-чиповых сборках). Результаты работы показывают, что значительная часть светодиодов, применяемых в системах общего освещения, уже сейчас может быть использована для передачи информации пользователям, например, в системах позиционирования в закрытых пространствах, для облегчения поиска нужных помещений и объектов и т.п.

Ключевые слова: белые светодиоды, передача информации, оптический диапазон, люминофоры, полоса пропускания.

Благодарности. Работа выполнена при государственной финансовой поддержке, выделяемой на реализацию Программы развития международных научных подразделений Университета ИТМО. Авторы благодарны Л.А. Никулиной за предоставленные образцы светодиодов.

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MODERN LED PHOSPHOR MATERIALS

M.S. Fudin^a, K.D. Mynbaev^{a,b}, H. Lipsanen^{a,c}, K.E. Aifantis^{a,d}, V.E. Bougrov^a, A.E. Romanov^{a,b}

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Karim.mynbaev@niuitmo.ru

^c Aalto University, Aalto, 02150, Finland

^d University of Arizona, Tucson, 85721, Arizona, USA

Abstract. Frequency characteristics of modern LED phosphor materials have been considered for the purpose of assessing the prospects of phosphor-based LEDs in wireless communication data systems which use optical wavelengths. The measurements have been carried out on the dependence of the emission intensity of single LEDs and LED chip-on-board modules with phosphors based on yttrium-aluminum and lutetium-aluminum garnets (with or without addition of nitride-based phosphors) as well as silicate-based phosphors, on the frequency of electric pulses exciting the emission. It was shown that from the point of view of data transmission rate, garnet-based phosphors (including systems with added nitride phosphors) are more promising than silicate-based ones. Garnet-based materials can be used in optical communication data systems with bandwidth (without extra modulation applied) up to 3 MHz with single-chip LEDs and up to 4.5 MHz with 9-chip LED chip-on-board modules. The results of the work indicate that a significant part of white LEDs used in general lighting systems can be even now used for data transfer, for example, in systems assisting positioning in closed spaces to facilitate people searching necessary rooms or objects.

Keywords: white LEDs, data transfer, optical wavelengths, phosphors, bandwidth.

Acknowledgements. This work was financially supported by the Russian Government via funds allotted for the implementation of the Program of International Scientific Departments development at ITMO University. The authors are thankful to L.A. Nikulina for supplying them with the samples of LEDs.

Введение

В последнее время активно развивается интерес к технологиям передачи данных при помощи видимого света (Visible Light Communication, VLC), использующим диапазон длин волны 375–780 нм. Основной задачей, решаемой в настоящее время разработчиками технологии VLC, является увеличение скорости передачи данных. Для этого используются различные аппаратные и программные средства [1, 2], рекорды скорости постоянно обновляются, и в идеальных условиях с использованием одиночного монохромного (длина волны 450 нм) светодиодного микрочипа на основе нитрида галлия (GaN) уже превышена скорость в 3 Гбит/с [3]. Однако одним из наиболее перспективных направлений технологий VLC является применение светодиодов одновременно и для передачи данных, и для освещения, для чего необ-

ходимо использовать светодиоды белого света. При использовании белого света максимальные скорости достигаются с помощью излучения, генерируемого так называемыми RGB-светодиодами, когда модуляция сигнала осуществляется отдельно по каждому из трех (R,G и B) каналов при средней скорости в 15 Мбит/с на канал. Это решение эффективно, но является весьма дорогостоящим. В то же время представляется, что многие задачи VLC можно решать с использованием уже существующих промышленных светодиодов, выпускаемых для систем общего освещения и обладающих низкой себестоимостью. Поскольку в системе «полупроводниковый чип–люминофор», используемой в большинстве современных белых светодиодов, наиболее инерционным является люминофор (так, стандартные синие чипы на основе GaN обеспечивают скорости передачи в 20 Мбит/с, в то время как добавление люминофора, как считается, снижает скорость на порядок, до 2 Мбит/с [4]), то для решения этих задач необходимо иметь представление о частотных характеристиках современных светодиодных люминофорных материалов.

Проблема заключается в том, что многие люминофорные материалы исходно создавались таким образом, чтобы обеспечить максимально длительное время высвечивания (с учетом эффекта насыщения люминофора), – в частности, чтобы скомпенсировать эффект мерцания из-за пульсаций тока в сетях питания светодиодов, – и, таким образом, по определению обладают низкой частотой переключения [5]. Время жизни люминесценции ионов церия в иттрий-алюминиевом гранате ($Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, наиболее распространенный люминофор для белых светодиодов) составляет около 65 нс [6], а типичное время высвечивания у большинства светодиодных люминофоров составляет несколько миллисекунд. Существуют люминофоры, излучающие свет в течение минут и даже часов после выключения возбуждения [7]. Естественно, что время высвечивания зависит от физических процессов в люминофоре, – типа используемых излучательных переходов, эффективности передачи возбуждения от матрицы к люминесцентному центру, наличия ловушек и т.п. В белых светодиодах сейчас в основном используются внутри- и межоболочечные переходы в ионах редкоземельных металлов (Ce, Eu и др.), внедренных в матрицу из граната, но набирают популярность и люминофоры, использующие другие ионы (в частности, Mn, Cu, Co), а также другие типы матриц. Сведения о частотных характеристиках подобных материалов и о потенциальных возможностях их применения в системах VLC соответственно в литературе отсутствуют: разработчики этих систем в своих экспериментах используют монохромные светодиоды без люминофора, отфильтровывают длины волн, излучаемые люминофором, или ограничиваются общим понятием «белый светодиод» (см., например, [2, 8–14]). В настоящей работе мы сообщаем о результатах исследования частотных характеристик ряда современных люминофорных материалов, используемых при разработке и производстве светодиодов, и кратко обсуждаем перспективы использования этих материалов в системах VLC.

Экспериментальная часть

В работе исследовались системы, в которых люминофорные материалы были использованы в маломощных светодиодах SMD серии OLP (номинальный ток 20 мА) и мощных 9-чиповых светодиодных сборках X10 серии OCC (номинальный ток 1050 мА) производства компании «Оптоган»¹. Источником электрических сигналов, возбуждавших излучение светодиодов, служил генератор Agilent 33522, выдававший импульсы прямоугольной формы. При исследовании мощных светодиодов в схему питания дополнительно включался линейный источник питания Matrix MPS-6003LK-2. Для регистрации сигнала использовался кремниевый фотодиод, подключенный к мультиметру MAST MY-65. Расстояние от светодиода до фотодиода при измерениях не превышало 10 мм. Дополнительная модуляция сигнала не проводилась.

В одночиповых маломощных светодиодах использовались следующие люминофоры: традиционный на основе иттрий-алюминиевого граната (ИАГ), легированного ионами церия $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$; ИАГ в комбинации с $AlCaSrClN_3Si:Eu^{2+}$; люминофор на основе лютетий-алюминиевого граната (ЛАГ) $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$, ЛАГ в комбинации с $AlCaSrClN_3Si:Eu^{2+}$; ЛАГ в комбинации с $(Ba,Ca,Sr)SiO_4:Eu^{2+}$; силикатные люминофоры $CaSiO_4:Eu^{2+}$, $BaSiO_4:Eu^{2+}$, $SrSiO_4:Eu^{2+}$. Также были проведены измерения частотных характеристик светодиода с прозрачным силиконовым эластомером без частиц люминофора. В мощных светодиодных сборках X10 использовались люминофоры $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$, $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$ и $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$ в комбинации с $AlCaSrClN_3Si:Eu^{2+}$.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) одночипового светодиода с силикатным люминофором $SrSiO_4:Eu^{2+}$. Как видно, характеристика имеет постоянный участок до частоты 2×10^5 Гц, после чего наблюдается довольно резкий спад. Спад до уровня в 3 дБ от исходного соответствовал частоте 3,2 МГц, что означало, что без дополнительной модуляции светодиод с данным люминофором позволял бы передавать данные со скоростью 3,2 Мбит/с (в идеальных условиях). Данное

¹ Нанозопром. Светодиодные компоненты [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nanoesoprom.com/catalog/open/63> свободный. Яз. рус. (дата обращения 06.10.2014).

значение оказалось максимальным для исследованных люминофорных материалов, использованных в одночиповых светодиодах.

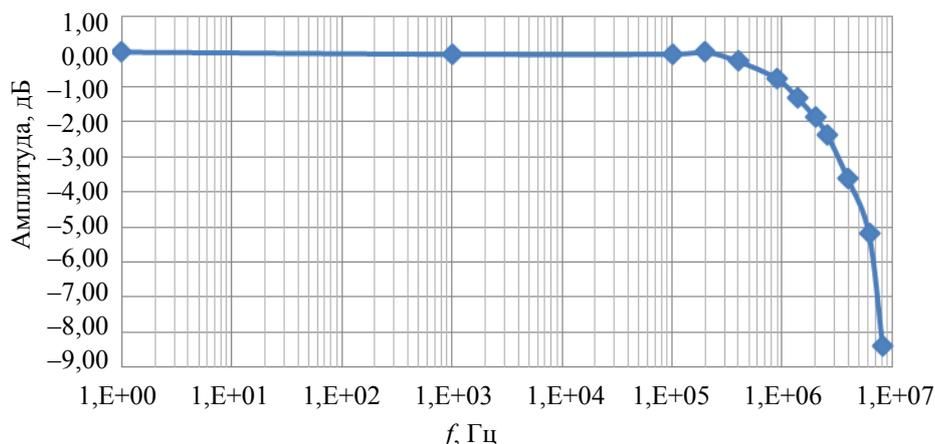


Рис. 1. АЧХ одночипового светодиода серии OLP с силикатным люминофором $SrSiO_4:Eu^{2+}$

На рис. 2 представлена АЧХ мощной светодиодной 9-чиповой сборки X10 с люминофором $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$. Здесь АЧХ демонстрирует постоянный спад, уровню спада в 3 дБ от исходного соответствовала частота 4,5 МГц. Это значение оказалось максимальным для исследованных люминофорных материалов, примененных в мощных светодиодных сборках.

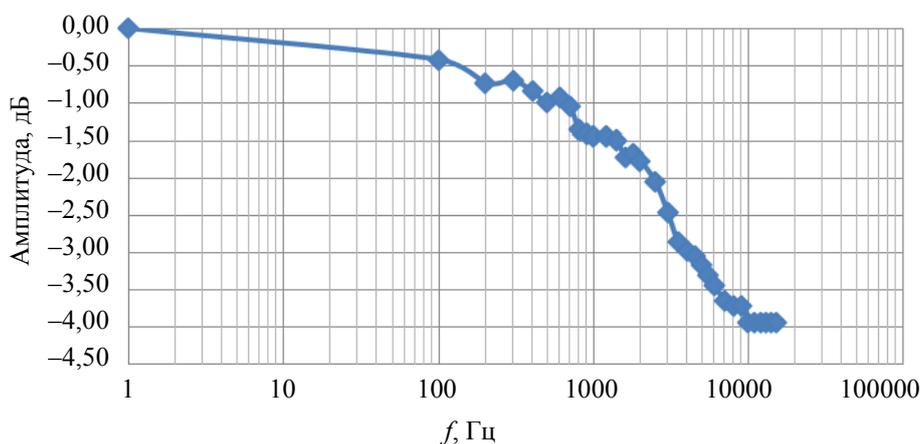


Рис. 2. АЧХ светодиодной сборки X10 с люминофором $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$

На рис. 3 представлены АЧХ светодиодов (одночипового и сборки X10) с люминофором $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$ в комбинации с нитридным люминофором $AlCaSrClN_3Si:Eu^{2+}$. Целью добавления нитридного люминофора является, как известно, получение более «теплого» белого света, востребованного в освещении жилых помещений, путем введения в «холодное» свечение ЛАГ красной (длина волны 580–650 нм) составляющей [15]. Для сравнения на рисунке также приведена АЧХ одночипового светодиода, в котором в силиконовый эластомер люминофор не добавлялся. В последнем случае и было получено максимальное значение ширины полосы пропускания. Оно составило 6,8 МГц, данная величина использовалась как референтная при интерпретации измерений, проведенных с использованием люминофоров. Как видно, при добавлении в эластомер люминофора частота среза АЧХ заметно уменьшается, причем для мощного одночипового светодиода это уменьшение значительно сильнее, чем для светодиодной сборки. Ширины полос АЧХ всех исследованных светодиодов приведены в таблице.

Таким образом, для исследованных люминофорных материалов в одночиповых светодиодах ширина полосы пропускания варьировалась от 1,8 МГц до 3,2 МГц, причем максимальный результат был достигнут при использовании светодиода со следующими люминофорами: силикатный $SrSiO_4:Eu^{2+}$, ЛАГ $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$ и люминофор на ИАГ с примесью нитрида $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}+AlCaSrClN_3Si:Eu^{2+}$. Для светодиодных сборок X10 ширина полосы пропускания варьировалась от 3,5 МГц до 4,5 МГц. Наилучший результат был достигнут при использовании светодиодной сборки с люминофором на $Lu_3Al_3O_{12}:Ce^{3+}$, что соответствовало результатам, полученным при измерении одночиповых светодиодов.

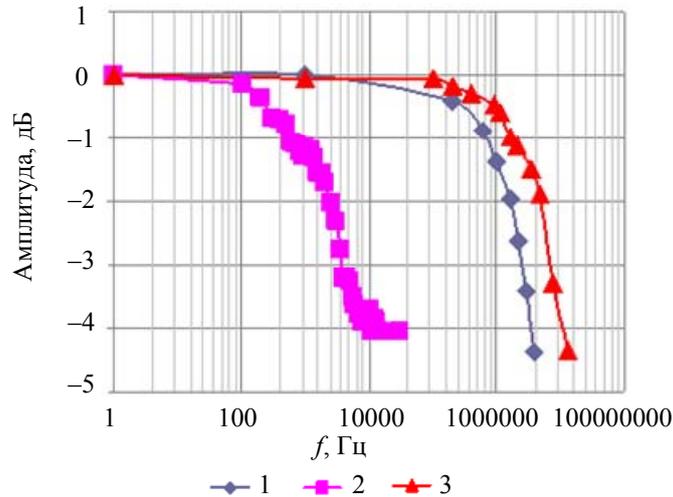


Рис. 3. АЧХ светодиодов (сборки X10 (1) и одночипового OLP (2)) с люминофором $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ в комбинации с $\text{AlCaSrClN}_3\text{Si}:\text{Eu}^{2+}$ и АЧХ OLP светодиода с силиконовым эластомером без частиц люминофора (3)

Люминофор	Ширина полосы пропускания, МГц	
	Светодиод OLP	Сборка X10
Без люминофора	6,8	–
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$	2,7	3,5
$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ с $\text{AlCaSrClN}_3\text{Si}:\text{Eu}^{2+}$	3,2	–
$\text{Lu}_3\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$	3,2	4,5
$\text{Lu}_3\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ с $\text{AlCaSrClN}_3\text{Si}:\text{Eu}^{2+}$	2,2	3,7
$\text{Lu}_3\text{Al}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ с $(\text{Ba}, \text{Ca}, \text{Sr})\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$	3,0	–
$\text{BaSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$	2,5	–
$\text{SrSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$	3,2	–
$\text{CaSiO}_4:\text{Eu}^{2+}$	1,8	–

Таблица. Ширина полосы АЧХ исследованных люминофоров

Анализируя полученные данные, отметим, что в целом для люминофоров на основе гранатов, легированных церием, частотные характеристики оказались лучше, чем для силикатных люминофоров, легированных европием. Высокое быстродействие люминофорных смесей на основе легированных церием ЛАГ хорошо известно [16]. Добавление силикатных люминофоров с европием к ЛАГ предсказуемо уменьшило полосу пропускания, то же самое касается и добавления к ЛАГ нитридного люминофора. Силикатные люминофоры, легированные европием, известны относительно длительным временем свечения, это позволяет использовать их в приложениях, требующих долговременной фосфоресценции люминофорного материала [17]. При этом различие в частотных характеристиках люминофоров различного химического состава, но использующих одни и те же ионы-активаторы, объясняется наличием разных типов ловушек, способных захватывать носители и «задерживать» процесс передачи возбуждения люминесцентным центрам [17]. Результат, согласно которому добавление нитридного люминофора к ИАГ несколько улучшило частотные характеристики получившейся люминофорной смеси, требует дополнительной проверки.

Частотные характеристики мощных светодиодных сборок оказались лучше характеристик мало-мощных светодиодов, использующих аналогичные люминофорные смеси. Этот результат также ожидаем, поскольку известно, что в экспериментах, подобных проведенным в нашей работе, чем выше интенсивность света, попадающего на фотоприемник, тем больше скорость передачи данных [18]. Для монохромных безлюминофорных светодиодов тенденция является обратной – уменьшение размеров (и соответственно мощности) светодиодных чипов позволяет снизить паразитную емкость и импеданс приборной структуры и повысить частоту модуляции излучения [3].

Полученные в работе результаты впервые позволяют разработать рекомендации по возможному использованию современных светодиодных люминофорных материалов в системах передачи данных,

использующих оптический диапазон. Как отмечалось выше, до сегодняшнего дня существовало обобщенное мнение о том, что люминофорные белые светодиоды имеют АЧХ, ограниченную полосой 2 МГц, что делало перспективы их применения в системах VLC весьма туманными [3, 12, 19, 20]. Проведенное авторами исследование показало, что цифра в 2 МГц справедлива лишь в отношении классического ИАГ, легированного церием, и для некоторых силикатных люминофоров. При использовании ЛАГ полоса пропускания может быть увеличена до 3 МГц, а применение в системах освещения вместо маломощных одночиповых светодиодов мультичиповых сборок позволяет увеличить ширину полосы АЧХ до 4,5 МГц, что вполне достаточно для многих современных приложений – в системах позиционирования в закрытых помещениях, на транспорте и т.д. Разумеется, при использовании светодиодов общего освещения для передачи информации необходимо проведение исследований влияния частоты и способа модуляции на качество белого света, однако подобные эксперименты нужно проводить уже при использовании дополнительных схем модуляции сигнала, применяемых для расширения полосы АЧХ и коррекции ошибок в системах VLC.

Заключение

Рассмотрены частотные характеристики современных светодиодных люминофорных материалов, применяющихся при разработке как одиночных белых светодиодов, так и светодиодныхборок. Показано, что с точки зрения скорости передачи информации люминофоры на основе гранатов (в том числе с добавлением нитридных люминофоров) более перспективны, чем силикатные люминофоры. Материалы на основе гранатов могут быть использованы в оптических системах передачи данных с полосой пропускания (без дополнительной модуляции) до 3 МГц в одночиповых светодиодах и до 4,5 МГц в 9-чиповых сборках, что достаточно для многих бытовых приложений.

Литература

1. Elgala H., Mesleh R., Haas H. Indoor broadcasting via white LEDs and OFDM // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2009. V. 55. N 3. P. 1127–1134.
2. Zhang H., Yuan Y., Xu W. PAPR reduction for DCO-OFDM visible light communications via semidefinite relaxation // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26. N 17. P. 1718–1721.
3. Tsonev D., Hyunhae Chun, Rajbhandari S., McKendry J.J.D., Videv S., Gu E., Haji M., Watson S., Kelly A.E., Faulkner G., Dawson M.D., Haas H., O'Brien D. A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride μ LED // *IEEE Photonics Technology Letters*. 2014. V. 26. N 7. P. 637–640.
4. Grubor J., Randel S., Langer K.-D., Walewski J.W. Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting // *Journal of Lightwave Technology*. 2008. V. 26. N 24. P. 3883–3892.
5. Smet P.F., Parmentier A.B., Poelman D. Selecting conversion phosphors for white light-emitting diodes // *Journal of the Electrochemical Society*. 2011. V. 158. N 6. P. R37–R54.
6. Bachmann V., Ronda C., Meijerink A. Temperature quenching of yellow Ce^{3+} luminescence in YAG:Ce // *Chemistry of Materials*. 2009. V. 21. N 10. P. 2077–2084.
7. van den Eeckhout K., Poelman D., Smet P.F. Persistent luminescence in non-Eu²⁺-doped compounds: a review // *Materials*. 2013. V. 6. N 7. P. 2789–2818.
8. Jovicic A., Li J., Richardson T. Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market // *IEEE Communications Magazine*. 2013. V. 51. N 12. P. 26–32.
9. Feng L.-F., Li Y., Li D., Wang C.-D., Zhang G.-Y., Yao D.-S., Liu W.-F., Xing P.-F. Frequency response of modulated electroluminescence of light-emitting diodes // *Chinese Physics Letters*. 2011. V. 28. N 10. Art. 107801.
10. McKendry J.J.D., Massoubre D., Zhang S., Rae B.R., Green R.P., Gu E., Henderson R.K., Kelly A.E., Dawson M.D. Visible-light communications using a CMOS-controlled micro-light-emitting-diode array // *Journal of Lightwave Technology*. 2012. V. 30. N 1. P. 61–67.
11. Wu Y., Yang A., Feng L., Zuo L., Sun Y.-N. Modulation based cells distribution for visible light communication // *Optics Express*. 2012. V. 20. N 22. P. 24196–24208.
12. Khalid A.M., Cossu G., Corsini R., Choudhury P., Ciarabella E. 1-Gb/s Transmission over a phosphorescent white LED by using rate-adaptive discrete multitone modulation // *IEEE Photonics Journal*. 2012. V. 4. N 5. P. 1465–1473.
13. Das P., Park Y., Kim K.-D. Performance of color-independent OFDM visible light communication based on color space // *Optics Communications*. 2014. V. 324. P. 264–268.
14. Sung J.-Y., Chow C.-W., Yeh C.-H. Is blue optical filter necessary in high speed phosphor-based white light LED visible light communications? // *Optics Express*. 2014. V. 22. N 17. P. 20646–220651.
15. Асеев В.А., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А., Никоноров Н.В., Рохмин А.С. Люминесценция марганца во фторфосфатных стеклах // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 6 (82). С. 36–39.

16. Babin V., Bichevin V., Gorbenko V., Kink M., Makhov A., Maksimov Y., Nikl M., Stryganyuk G., Zazubovich S., Zorenko Y. Time-resolved spectroscopy of exciton-related states in single crystals and single crystalline films of $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ and $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ // *Physica Status Solidi (B) Basic Research*. 2011. V. 248. N 6. P. 1505–1512.
17. Van den Eeckhout K., Smet P.F., Poelman D. Persistent luminescence in Eu^{2+} -doped compounds: a review // *Materials*. 2010. V. 3. N 4. P. 2536–2566.
18. Grobe L., Paraskevopoulos A., Hilt J., Schulz D., Lassak F., Hartlieb F., Kottke C., Jungnickel V., Langer K.-D. High-speed visible light communication systems // *IEEE Communications Magazine*. 2013. V. 51. N 12. P. 60–66.
19. Komine T., Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights // *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2004. V. 50. N 1. P. 100–107.
20. Vucic J., Kottke C., Nerreter S., Langer K.-D., Walewski J.W. 513 Mbit/s visible light communications link based on DMT modulation of a white LED // *Journal of Lightwave Technology*. 2010. V. 28. N 24. P. 3512–3518.

- Фудин Максим Сергеевич** – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Wizmaks1991@mail.ru
- Мынбаев Карим Джафарович** – доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; заведующий лабораторией, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Karim.mynbaev@niuitmo.ru
- Липсанен Харри** – D.Sci., профессор, профессор-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Университет Аалто, Аалто, 02150, Финляндия, harri.lipsanen@aalto.fi
- Айфантис Катерина** – PhD, профессор-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Университет Аризоны, Таксон, 85721, Аризона, США, aifantis@email.arizona.edu
- Бугров Владислав Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru
- Романов Алексей Евгеньевич** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; главный научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, Alexey.romanov@niuitmo.ru
- Maxim S. Fudin** – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Wizmaks1991@mail.ru
- Karim D. Mynbaev** – D.Sc., Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Head of laboratory, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Karim.mynbaev@niuitmo.ru
- Harri Lipsanen** – D.Sc., Professor, Professor-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russia; Professor, Aalto University, Aalto, 02150, Finland, harri.lipsanen@aalto.fi
- Katerina E. Aifantis** – PhD, Professor-researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Professor, University of Arizona, Tucson, 85721, Arizona, USA, aifantis@email.arizona.edu
- Vladislav E. Bougrov** – D.Sc., Department head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Vladislav.bougrov@niuitmo.ru
- Alexei E. Romanov** – D. Sc., Professor, Department head, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; leading scientific researcher, Ioffe Institute, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, Alexey.romanov@niuitmo.ru

Принято к печати 01.09.14
Accepted 01.09.14