

# Люминофоры и люминесцентные конвертеры в источниках света на основе синих светодиодных кристаллов

В.А. ЛАПИНА<sup>1</sup>, П.П. ПЕРШУКЕВИЧ<sup>1</sup>, А.В. ТРОФИМОВ<sup>2</sup>,  
Н.Н. ТРОФИМОВА<sup>2</sup>, Ю.Б. ЦАПЛЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск

<sup>2</sup> Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва

E-mail: tsap\_04@mail.ru

## Аннотация

Представлен обзор исследований по применению люминесцентных материалов: неорганических фосфоров, органических полимерных и молекулярных люминофоров, комплексных соединений, квантовых точек и каркасных металлоорганических соединений в качестве основы люминесцентных конвертеров для преобразования света синих и ультрафиолетовых диодных кристаллов в белый свет.

**Ключевые слова:** органические и неорганические люминесцентные материалы, белые светодиоды.

## Введение

Применение люминофоров в источниках света началось с люминесцентной лампы (ЛЛ), в которой УФ излучение ртутного разряда НД преобразуется в видимый свет люминофором, нанесённым на стенки разрядной трубки [1]. Двадцать лет назад идея люминесцентного преобразования была использована и в схеме получения белого света из света светодиодных (СД) синих кристаллов (СК) [2]. Ясно, что ЛЛ и СД лампы – близкие родственники по линии люминесценции.

Настоящий обзор посвящён двадцатилетней истории многочисленных подходов и попыток получения белого света с использованием энергоэффективных СК или, в меньшей мере, диодных УФ кристаллов (УФК) в качестве первичного источника излучения (ИИ).

В ЛЛ потребляемая электроэнергия преобразуется в УФ излучение очень эффективно, с энергетическим КПД выше 64% [3], тогда как этот параметр у СК – около 50% [4]. Однако преобразование УФ излучения ртут-

ного разряда НД в видимое сопровождается большими энергетическими потерями. Главная причина этого – Stokes сдвиг. (Если частота возбуждающего излучения –  $\nu_{ex}$ , а частота испускаемого –  $\nu_{em}$ , то, т.к.  $\nu_{em} < \nu_{ex}$ , разность  $h(\nu_{ex} - \nu_{em})$  выражает тепловые потери.) В ЛЛ частоты возбуждающих ртутных линий 254 и 185 нм отличаются от частот видимого излучения в среднем в несколько раз, тогда как при люминесцентном преобразовании синего излучения СК частоты возбуждающего и испускаемого света принадлежат видимому диапазону спектра и в среднем различаются менее чем в 1,5 раза. А, например, при кооперативной люминесценции (вид антистоксовой люминесценции) Stokes потери отсутствуют, а энергетический КПД первичного ИИ – лазера ближнего ИК диапазона составляет 50%.

Оптическое устройство, помещаемое на пути светового потока от первичного источника электромагнитного излучения, поглощающее это излучение и испускающее свет посредством люминесценции, представляет собой люминесцентный конвертер (ЛК). ЛК бывают двух видов – люминесцентные экраны (ЛЭ) и люминесцентные фильтры (ЛФ), которые различаются тем, что ЛЭ не пропускают, а ЛФ пропускают излучение первичного ИИ. Эффективность работы ЛК как преобразователя энергии определяется квантовым выходом люминофора (КВЛ), а для ЛК как оптического устройства очень важны способы ввода возбуждающего излучения в ЛК и вывода испускаемого излучения из него, но это тема отдельного обзора. Весьма схематично способы расположения ЛК относительно локализованного первичного ИИ, каковым является СК, делятся на два варианта: ЛК либо примыка-

ет к СК (вариант 1), либо находится от него на некотором удалении (вариант 2).

Сообщения об успехах на пути создания белых СД с ЛК начали поступать в 1997 г. П. Шлоттер, Р. Шмидт и Ю. Шнайдер вводили в эпоксидную смолу (ЭС), примыкающую к СК, люминесцентные зелёный, жёлтый и красный периленовые красители или же жёлтый неорганический фосфор  $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$  [5]. В результате в обоих случаях на базе СК были получены белые СД. Аналогичный результат в том же 1997 г. получили А. Хигер с сотрудниками. Они использовали ЛК (ЛФ) на основе люминесцирующего полимера, который при возбуждении СК давал жёлтую люминесценцию, и вариант удалённого расположения ЛК [6]. Наконец, тогда же, вышла книга [7], рассказавшая миру о работах по созданию СК и последующих разработках, которые многие годы проводились С. Накамуры и др. в компании *Nichia*, в том числе и про разработку белых СД. В последних в качестве люминофора использовался фосфор состава  $(Y_{1-a}Gd_a)_3(Al_{1-b}Ga_b)_5O_{12}:Ce$  ( $a, b = 0-0,5$ ) и было показано, как, меняя состав фосфора, получать белый свет разной цветности. Координаты цветности (КЦ) белого света ( $x$  и  $y$ ), полученного в [5], неизвестны, а у образцов, полученных в [6], они равнялись 0,34 и 0,29, 0,41 и 0,32 и 0,55 и 0,38 соответственно. Белый СД С. Накамуры имел КЦ 0,29 и 0,30 и световую отдачу (СО) 5 лм/Вт [7]. Во всех упомянутых выше публикациях были верно оценены перспективы применения СД с ЛК в качестве источника света для освещения.

После 1997 г. рост исследований по получению белого света, пригодного для освещения, на основе СК, УФК и ЛК имел лавинообразный характер.

## Неорганические фосфоры

Удачной находкой авторов работ [5, 7, 8] было применение в ЛК иттрий-алюминиевого граната, легированного церием ( $YAG:Ce$ ). Он стал базовым материалом ЛК для СК. Поглощает в синей области спектра, устойчив к воздействию повышенных температур и облучённостей [2, 9]. В лучших образцах имеет квантовый выход люминесценции более 0,81 [10], а в коммерческих образцах (в 2006 г.) – от 0,61 до 0,70 [11]. Обзор

работ до 2014 г. по применению фосфоров дан в [12].

Предмет многих исследований – вопросы технологии выращивания кристаллов фосфора и форм его использования в белых СД (материал для литья, порошок или наноккомпозит) [13–20].

Во многих работах исследованы составы, в которых ионы иттрия и церия заменены на ионы других редкоземельных элементов [21–26]. Из модификаций фосфора  $YAG:Ce$  особо интересен  $Gd-YAG:Ce$ , в котором часть ионов иттрия заменена на ионы гадолиния [27–29].  $Gd-YAG:Ce$  обладает повышенной термостабильностью. Если яркость люминесценции  $YAG:Ce$  при повышении температуры от 25 до 205 °С падает более чем на 60%, то у  $Gd-YAG:Ce$  – всего на 20%.  $Gd-YAG:Ce$  обеспечивает высокую СО: 144 лм/Вт при коррелированной цветовой температуре  $T_{ки}$  5639 К и 127 лм/Вт при  $T_{ки}$  4490 К.

Получен термостабильный фосфор  $K_2TiF_6:Mn^{4+}$ , не содержащий редкоземельных элементов и обладающий красным свечением с квантовым выходом 0,98 при возбуждении синим излучением [30]. Образцы ЛК на основе жёлтого фосфора  $YAG:Ce$  и красного фосфора  $K_2TiF_6:Mn^{4+}$  при работе с СК (455 нм) позволили получить свет с  $T_{ки}$  2700–2800 К,  $R_a$  83–85 и СО 99–124 лм/Вт.

В плане упрощения технологии производства осветительных устройств на основе синих СК популярна идея использования удалённого расположения ЛК. В [18] сообщено о способе изготовления ЛК в виде стеклокерамического диска, наполненного люминесцентным ультрадисперсным порошком  $YAG:Ce$ .

Практическим результатом исследований по ЛК на основе неорганических фосфоров является весь ассортимент белых СД ламп.

## Органические люминесцентные конвертеры

### Полимерные люминофоры

Материалом полимерного ЛК [6, 31] являются сопряжённые (конъюгированные) полимеры типа полифениленвинилена: поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена) **1** (рис. 1), поли(2-метокси-5-(2'-этилгексилокси)-1,4-фениленвинилена)-

со-(2-бутил-5-(2'-этилгексил)-1,4-фениленвинилена) **2** и др. Эти полимеры люминесцируют в видимой области спектра и сильно поглощают свет в синей, где показатели поглощения порядка  $10^5$  см<sup>-1</sup>. Образцы полимерного ЛК изготавливали из субмикронных слоёв сопряжённых полимеров, которые защищали от влияния внешней среды слоями стекла либо инкапсулированием. Расположение полимерных ЛК относительно первичного ИИ с самого начала предлагалось в удалённом варианте. Лучшие образцы имели квантовый выход люминесценции на уровне 0,6 [31, 32]. Использование полимерных ЛК с разными СК позволило получить свет с КЦ, очень близкими к характерным для белого цвета. В ходе испытаний длительностью более 4000 ч образцы полимерных ЛК показали стабильность не хуже, чем у СК.

Применению полифлуоренов в источниках белого света посвящены работы [33–35]. В [33, 34] был получен полифлуорен **3** с молекулярным весом около 20000 ( $n \approx 40$ ) и азидными боковыми группами, которые обеспечивают поперечное сшивание полимерных цепей. Полимер обладал при УФ возбуждении люминесценцией белого цвета с квантовым выходом 0,86. ЛЭ из этого полимера при работе имел КЦ 0,2554 и 0,2426,  $T_{ки}$  32400 К и  $R_a$  91. В [35] материалом для ЛК служил полимерный композиционный материал: в матрицу полиметилметакрилата (ПММА) были введены полифлуорен **4** с синей люминесценцией и квантовые точки (КТ) на основе  $CdSe/ZnS$  с синей и жёлтой люминесценцией. Этот материал дозированно наносился непосредственно на УФК. Образцы ЛК на основе полифлуорена **4** и КТ с жёлтой люминесценцией испускали белый свет с  $T_{ки}$  от 3000 до 9000 К и  $R_a$  85–90. Несмотря на то, что квантовая эффективность люминесценции полифлуорена **4** и КТ в растворе была высока (0,9 и 0,52 соответственно), квантовая эффективность самого ЛК была 0,17, а СО – порядка 13 лм/Вт. О стабильности ЛК в [33–35] не сообщалось.

### Молекулярные люминофоры

За последние 20 лет возможность применения молекулярных люминофоров в ЛК исследовалась в ряде работ. Были опробованы ЛК на основе

4-диметиламинохалкона **5** и нильско-го красного (7-диэтиламино-3,4-бензофеноксазон **6**) в матрице ЭС [36]; 4-дифениламинохалкона **7** в полиэтиленгликоле (ПЭГ-6000) [37]; 4-N, N-дифенил-9-(4-трет-бутилфенил)-1,8-нафталимида **8** и флуоресцеина (в виде уранина) в ЭС и ПММА [38]. ЛК на основе сополимера производного нафталимида **9** с ПММА **10** при удалённом расположении имел стабильные характеристики в течение 12 суток непрерывной работы [39]. Однако квантовые выходы люминесценции соединений **9** и **10** существенно ниже, чем у **8** в ПММА (0,65; 0,36 и 0,96 соответственно). Применению в ЛК жёлтого люминесцентного красителя *Lumogen F 083* **11** и красного *Lumogen F 305* **12** посвящены работы [40–43]. Бор-дифтор производное дипирролметана **13**, а именно соединение **14**, было использовано в ЛК для СК в [44]. Агрегационный люминофор 4,7-бис[4-(1,2,2-трифенилвинил)фенил]бензо-2,1,3-тиодиазол **15** использован в работе [45]. Кумарин-6 **16**, кумарин 30 **17** и N-алкилированный дипирролопиролл с тиофеновыми заместителями **18**, а также 7-(диэтиламино)-кумарин-3-карбоновой кислоты **19** и 4-(дицианометилен)-2-метил-6-(4-диметиламиностерил)-4Н-пиран **20** были основой ЛК в [46–48].

Заметная деградация люминофоров в перечисленных публикациях наблюдалась при работе от 10 мин [45] до 10 суток [48].

### Комплексные соединения

Металлопорфирины и комплексные соединения металлов относят к перспективным материалам оптоэлектроники. В [49] исследована возможность их использования в ЛК на примере платина(II) мезотетракис(пентафторфенил)порфирина **21** и трис(8-оксихиноли-ната) алюминия(III) **22**. Люминесценция соединения **21** в матрице ПК не изменяется при 120 °С в течение 1000 ч. Интенсивность люминесценции **21** снижается на треть после УФ облучения при облучённости 10 Вт/м<sup>2</sup> в течение 100 ч. Излучение УФК при определённой концентрации соединения **21** и **22** преобразуется в белое с КЦ 0,32 и 0,31, ИЦ 90,6,  $T_{ки}$  6800 К при СО 10 лм/Вт.

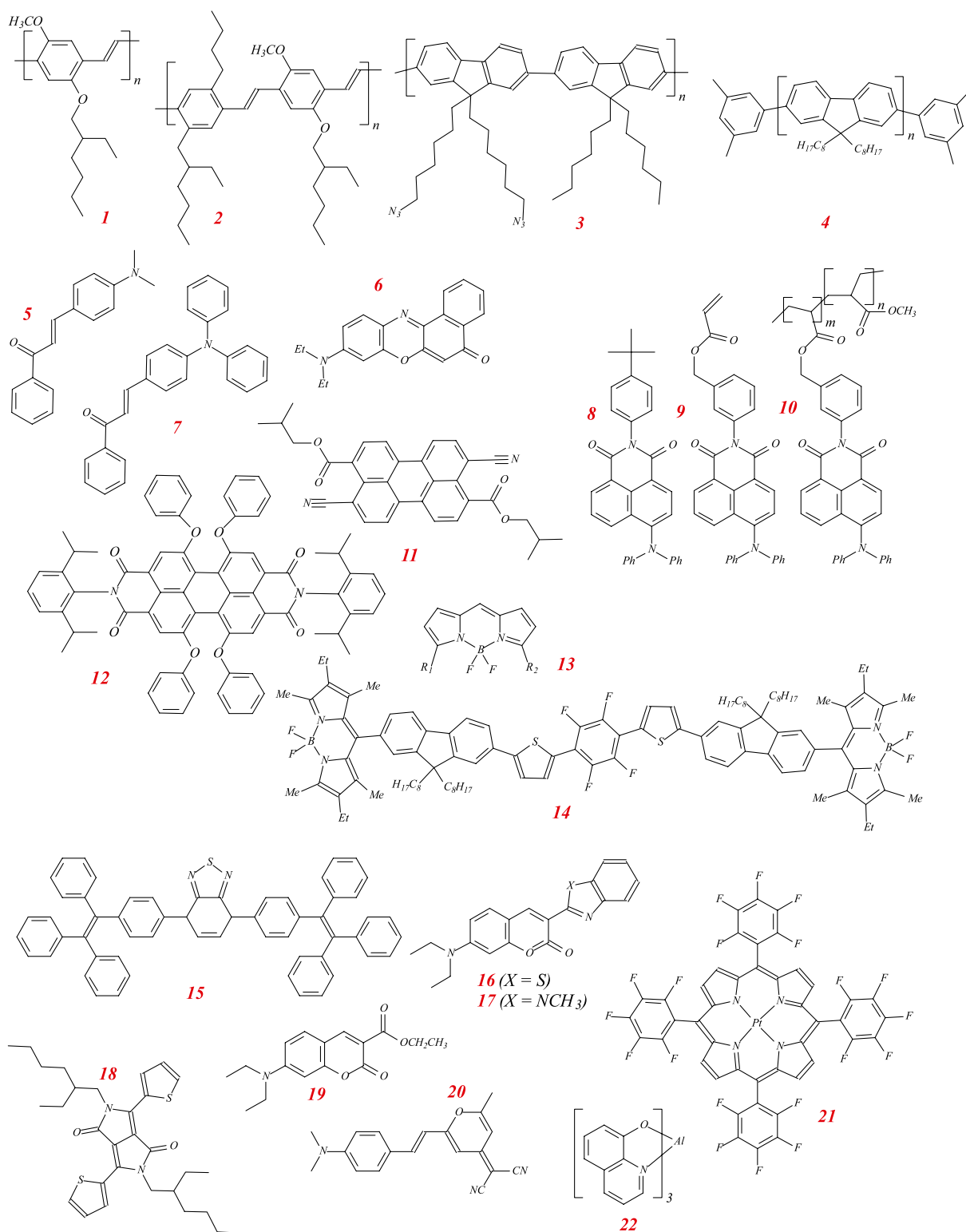


Рис. 1. Структурные формулы некоторых люминофоров

### Квантовые точки

Первые исследования возможности использования квантовых точек (КТ) в ЛК для СД представлены в [50, 51]. В [50] белый свет был получен соединением голубой люминесценции органического полимера с зелёной и крас-

ной люминесценцией *CdSe* КТ двух видов (размером 3 и 7 нм), а в [51] – за счёт использования *CdSe* КТ одного вида (размером 1,5 нм). Синтезированные в [51] КТ имели широкий спектр излучения, выраженный край в длинноволновой полосе поглощения и относительно большой стоксов

сдвиг. Авторы сообщили о 10-суточной рабочей стабильности, но квантовый выход люминесценции материала был очень мал – около 0,02. В книгах же по нанотехнологиям замечательным свойством люминесценции КТ называют ровно противоположное – узость спектра излучения, широкую



полосу поглощения и высокий квантовый выход. «Узкополосные» КТ уже скоро, вероятно, станут люминесцентным материалом, пришедшим на смену технологиям на базе органических СД в цветных дисплеях (система «Color IQ» компании QD Vision). А у «широкополосных» КТ так и не удалось поднять квантовый выход до приемлемого уровня.

Примером удачного использования в ЛК для СК «узкополосных» КТ с жёлтой люминесценцией служит работа [52]. Она выполнена на коллоидных КТ, имеющих ядро состава  $Cu-In-S$  при отношении  $Cu/In = 1/4$ , с двумя защитными оболочками  $ZnS$ . Размер ядра КТ – 2,72 нм. КТ имели высокий квантовый выход люминесценции: 0,92–0,97. При этом использовался  $SiO_x$  полимер для защиты слоя с КТ от проникновения и разрушающего действия  $O_2$ .

#### Каркасные металлоорганические соединения

Каркасные металлоорганические соединения (КМС) – это новый класс кристаллических материалов, которые состоят из катионов переходных металлов и полиденатных органических лигандов. Характерной особенностью кристаллической структуры каркасной металлоорганики является наличие микроскопических пор или каналов, в которых могут находиться молекулы-гости.

КМС как люминесцентные материалы привлекают возможностью использовать в центрах люминесценции неорганические и органические блоки или вводить в состав КМС молекулы люминофоров в качестве гостей, размещая их в порах. Результаты исследований применимости КМС в ЛК приведены в статьях [53–56]. На сегодня самый большой квантовый выход белой люминесценции КМС, равный 0,2, был получен в работе [56]. Белая люминесценция при УФ возбуждении стала результатом сложения синей люминесценции матрицы и жёлтой люминесценции иридиевого комплекса –  $[Ir(pppy)_2(bpy)]^+$  ( $pppy$  – 2-фенилпиридин,  $bpy$  – 2,2'-бипиридин), размещённого в порах хозьяина. Квантовый выход люминесценции материала понижался на 10% при 150 °С, что свидетельствует о его высокой термостабильности. О фотостабильности материала не сообщалось.

#### Заключение

1. В настоящее время неорганические фосфоры – единственный класс люминесцентных материалов, которые успешно применяются в ЛК для СК и УФК в области освещения.

2. Среди органических люминофоров наиболее перспективны для применения в ЛК полимерные люминофоры.

3. Непреодоленное препятствие применению молекулярных органических люминофоров в ЛК – фотодеградация люминофоров при сравнительно высоких уровнях абсорбируемой энергии, которая усиливается под действием кислорода. Тем не менее эти материалы интересны для светотехники, например, в декоративно-оформительском плане и в наружной световой рекламе.

4. Фотохимическая стабильность новых люминесцентных материалов, к которым относятся комплексные соединения, КТ и КМС, ещё мало исследована, и перспективы их применения в ЛК неясны.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 16–53–00141 и БРФФИ № Ф16Р-077.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. под ред. А.Э. Юновича. 3-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
3. Фабрикант В.А. Физика, оптика, квантовая электроника: Избранные статьи. – М.: Изд. МЭИ, 2000. – С. 96–111.
4. Бугров В.Е. Физические основы оптимизации нитридных полупроводниковых гетероструктур для их применения в высокоэффективных светодиодных устройствах / Дис. ... д.ф.-м.н. – Санкт-Петербург: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013.
5. Schlotter P., Schmidt R., Schneider J. Luminescence conversion of blue light emitting diodes // Appl. Phys. A. – 1997. – Vol. 64, No. 4. – P. 417–418.
6. Hide F., Kozodoy P., DenBaars S.P., Heeger A.J. White light from InGaN/conjugated polymer hybrid light-emitting diodes // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 70. № 20. – P. 2664–2666.
7. Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diode. GaN Based Light Emitters and Lasers. – Berlin: Springer-Verlag, 1997. – 343 p.
8. Schlotter P., Baur J., Hieslcher C., Kunzer M., Obloh H., Schmidt R., Schneider J. Fabrication and characterization of GaN/InGaN/AlGaIn double heterostructure LEDs and their application

in luminescence conversion LEDs // Mat. Sci. Eng. B. – 1999. – Vol. 59, No. 1. – P. 390–394.

9. Социн Н.П., Большухин В.А., Личманова В.Н. Совершенствование технологии производства мультилигандных фотолуминофоров для эффективных СД // Нанотехника. – 2013. – № 2. – С. 3–11.

10. Dwivedi J., Kumar P., Kumar A., Singh V.N., Singh B P., Dhawan S.K., Gupta B.K. A commercial approach for the fabrication of bulk and nano phosphors converted into highly efficient white LEDs // RSC Advances. – 2014. – Vol. 4. (98). – P. 54936–54947.

11. Haranath D., Chander H., Sharma P., Singh S. Enhanced luminescence of  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  nanophosphor for white light-emitting diodes // App. Phys. Lett. – 2006. – Vol. 89, No.173118.

12. McKittrick J., Shea-Rohwer L.E. Review: Down Conversion Materials for Solid-State Lighting // J. Amer. Ceramic Soc. – 2014. – Vol. 97 (5). – P. 1327–1352.

13. Poddenezhnyi E.N., Dobrodei A.O., Boiko A.A., Zdravkov A.V., Grishkova E.I., Khimich N.N. Formation of nanostructured particles of cerium-activated yttrium aluminum garnet by combustion method // Glass Phys. Chem. – 2011. – Vol. 37 (5). – P. 520–523.

14. Naik S.R., Shripathi T., Salker A.V. Preparation, characterization and photoluminescent studies of Cr and Nd co-doped Ce: YAG compounds // Journal of Luminescence. – 2015. – Vol. 161. – P. 335–342.

15. Jia D. Nanophosphors for White Light LEDs // Chem. Eng. Comm. – 2007. – Vol. 194 (12). – P. 1666–1687.

16. Park K.W., Lim S.G., Deressa G., Kim J.S., Kang T.W., Choi H.L., Yu Y.M., Kim Y.S., Ryu J.G., Lee S.H., Kim T.H. High power and temperature luminescence of  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  bulky and pulverized single crystal phosphors by a floating-zone method // Journal of Luminescence. – 2015. – Vol. 168. – P. 334–338.

17. Давыдова О.В., Павленок А.В., Добродей А.О., Подденежный Е.Н., Дробышевская Н.Е., Алексеенко А.А., Бойко А.А. Особенности синтеза ультрадисперсных порошков иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия с использованием метода горения // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2016. – Т. 1 (2). – С. 45–52.

18. Давыдова О.В., Павленок А.В., Добродей А.О., Подденежный Е.Н., Дробышевская Н.Е., Бойко А.А., Кравченко А.И., Савкова Т.Н. Получение и спектрально-люминесцентные характеристики композиционных материалов на основе YAG: Ce для светодиодных преобразователей // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2016. – Т. 1 (3). – С. 24–31.

19. Im W.B., Brinkley S., Hu J., Mikhailovsky A., DenBaars S.P., Seshadri R.  $Sr_{2.975-x}Ba_xCe_{0.025}AlO_4F$ : a Highly Efficient Green-Emitting Oxyfluoride Phosphor for Solid State White Lighting // Chem. Materials. – 2010. – Vol. 22. – P. 2842–2849.

20. Nyman M., Shea-Rohwer L.E., Martin J.E., Provencio P. Nano-YAG: Ce mechanisms

of growth and epoxy-encapsulation // *Chem. Materials*. – 2009. – Vol. 21. – P. 1536–1542.

21. Брискина Ч.М., Румянцев С.И., Рыжков М.В., Социн Н.П., Спаский Д.А. Поиск оптимальных составов гранатовых люминофоров с  $Ce^{3+}$  для белых светодиодов // *Светотехника*. – 2012. – № 5. – С. 37–39.

22. Социн Н.П., Гальчина Н.А., Коган Л.М., Широков С.С., Юнович А.Э. Светодиоды «тёплого» белого свечения на основе p-n гетероструктур типа InGaN/AlGaIn/GaN, покрытых люминофорами из иттрий-гадолиниевых гранатов // *Физика и техника полупроводников*. – 2009. – Т. 43 (5). – С. 700–704.

23. Jang H.S., Won Y. – H., Jeon D.Y. Improvement of electroluminescent property of blue LED coated with highly luminescent yellow-emitting phosphors // *Appl. Phys. B*. – 2009. – Vol. 95, No. 4. – P. 715–720.

24. Кичанов С.Е., Фролова Е.В., Шевченко Г.П., Козленко Д.П., Белушкин А.В., Луккин Е.В., Малашкевич Г.Е., Рахманов С.К., Глазков В.П., Савенко Б.Н. Исследование структурных особенностей кристаллофосфора  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}/Lu_2O_3$  при его формировании коллоидно-химическим методом // *Физ. твёрд. тела*. – 2013. – Т. 55, № 4. – С. 745–751.

25. Kawano Y., Kim S.W., Ishigaki T., Uematsu K., Toda K., Takaba H., Sato M. Site engineering concept of  $Ce^{3+}$ -activated novel orange-red emission oxide phosphors // *Opt. Mat. Express*. – 2014. – Vol. 4, No. 9. – С. 1770–1774.

26. Dong X., Zhang J., Zhang L., Zhang X., Hao Z., Luo Y. Yellow-Emitting  $Sr_9Sc(PO_4)_7: Eu^{2+}, Mn^{2+}$  Phosphor with Energy Transfer for Potential Application in White Light-Emitting Diodes // *Europ. J. Inorg. Chem*. – 2014. – No. 5. – P. 870–874.

27. Yang C., Gu G., Zhao X., Liang X., Xiang W. The growth and luminescence properties of  $Y_3Al_5O_{12}: Ce^{3+}$  single crystal by doping  $Gd^{3+}$  for W-LEDs // *Mat. Lett.* – 2016. – Vol. 170. – С. 58–61.

28. Chen J., Deng Z., Liu Z., Lin Y., Lan H., Chen D., Fei B., Wang C., Wang F., Hu Q., Cao Y. Optical enhancement brought by doping  $Gd^{3+}$  ions into Ce: YAG ceramics for indoor white light-emitting diodes // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23 (7). – P. A292–A298.

29. Shi H., Zhu C., Huang J., Chen J., Chen D., Wang W., Cao Y., Yuan X. Luminescence properties of YAG: Ce, Gd phosphors synthesized under vacuum condition and their white LED performances // *Optical Materials Express*. – 2014. – Vol. 4 (4). – P. 649–655.

30. Zhu H., Lin C.C., Luo W., Shu S., Liu Z., Liu Y., Kong J., Ma E., Cao Y., Liu R.S., Chen X. Highly efficient non-rare-earth red emitting phosphor for warm white light-emitting diodes // *Nature Comm.* – 2014. – Vol. 5. – AN. 4312.

31. Zhang C., Heeger A.J. Gallium nitride/conjugated polymer hybrid light emitting diodes: Performance and lifetime // *J. Appl. Phys.* – 1998. – V. 84, No. 3. – P. 1579–1582.

32. Andersson M.R., Yu G., Heeger A.J. Photoluminescence and electroluminescence of films

from soluble PPV-polymers // *Synth. Metals*. – 1997. – Vol. 85, No. P. – 1275–1276.

33. Huyal I.O., Koldemir U., Ozel T., Demir H.V., Tuncel D. On the origin of high quality white light emission from a hybrid organic/inorganic light emitting diode using azide functionalized polyfluorene // *J. Mat. Chem.* – 2008. – Vol. 18, No. 30. – P. 3568–3574.

34. Huyal I.O., Ozel T., Koldemir U., Nizamoglu S., Tuncel D., Demir H.V. White emitting polyfluorene functionalized with azide hybridized on near-UV light emitting diode for high color rendering index // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, No. 2. – P. 1115–1124.

35. Chen K.J., Lai Y.C., Lin B.C., Lin C.C., Chiu S.H., Tu Z.Y., Meng H.F. Efficient hybrid white light-emitting diodes by organic-inorganic materials at different CCT from 3000 K to 9000 K // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, No. 7. – P. A204–A210.

36. Ermakov O.N., Kaplunov M.G., Efimov O.N., Yakushchenko I.K., Belov M.Y., Budyka M.F. Hybrid organic-inorganic light-emitting diodes // *Microel. Eng.* – 2003. – Vol. 69, No. 2. – P. 208–212.

37. Zhang L., Li B., Lei B., Hong Z., Li W. A triphenylamine derivative as an efficient organic light color-conversion material for white LEDs // *Journal of Luminescence*. – 2008. – Vol. 128. – P. 67–73.

38. Kim H.J., Jin J.Y., Lee Y.S., Lee S.H., Hong C.H. An efficient luminescence conversion LED for white light emission, fabricated using a commercial InGaN LED and a 1,8-naphthalimide derivative // *Chem. Phys. Lett.* – 2006. – Vol. 431, No. 4. – P. 341–345.

39. Jin J.Y., Kim Y.M., Lee S.H., Lee Y.S. Synthesis of an acrylic copolymer bearing fluorescent dye pendants and characterization as a luminescence conversion material in fabrication of a luminescence conversion light-emitting diode // *Synth. Metals*. – 2009. – Vol. 159, No. 17. – P. 1804–1808.

40. Caruso F., Mosca M., Macaluso R., Feltrin E., Cali C. Generation of white LED light by frequency downconversion using perylene-based dye // *Electron. Lett.* – 2012. – Vol. 48, No. 22. – P. 1417–1419.

41. Mosca M., Caruso F., Zambito L., Seminaro B., Macaluso R., Cali C., Feltrin E. Warm white LED light by frequency down-conversion of mixed yellow and red Lumogen // *Proc. SPIE*. – 2013. – Vol. 8767. – P. 87670L.

42. Mosca M., Caruso F., Zambito L., Macaluso R., Cali C., Feltrin E. Hybrid LEDs Pave Way to New Lighting Applications // *Photonics Spectra*. – 2013. – Vol. 47, No. 4. – P. 60–64.

43. Caruso F., Mosca M., Rinella S., Macaluso R., Cali C., Saiano F., Feltrin E. Frequency-Downconversion Stability of PMMA Coatings in Hybrid White Light-Emitting Diodes // *J. Electron. Mat.* – 2016. – Vol. 45, No. 1. – P. 682–687.

44. Findlay N.J., Bruckbauer J., Inigo A.R., Breig B., Arumugam S., Wallis D.J., Skabara P.J. An Organic Down-Converting Material for White-Light Emission from Hybrid LEDs // *Advanced Mat.* – 2014. – Vol. 26, No. 43. – P. 7290–7294.

45. Yue Z., Cheung Y.F., Choi H.W., Zhao Z., Tang B.Z., Wong K.S. Hybrid GaN/Organic white light emitters with aggregation induced emission organic molecule // *Optic. Mat. Exp.* – 2013. – Vol. 3, No. 11. – P. 1906–1911.

46. Kim S.W., Yoo H.S., Kwon B.H., Kang D.S., Suh M., Jeon D.Y. Organic wavelength converting film based hybrid planar white light emitting diodes // *J. Soc. Inform. Display*. – 2010. – Vol. 18, No. 12. – P. 1104–1110.

47. Di Martino D., Beverina L., Sassi M., Brovelli S., Tubino R., Meinardi F. Straight-forward fabrication of stable white LEDs by embedding of inorganic UV-LEDs into bulk polymerized polymethyl-methacrylate doped with organic dyes // *Sci. Rep.* – 2014. – Vol. 4, No. 4400. – P. 1–5.

48. Luridiana A., Pretta G., Chiriu D., Carbonaro C.M., Corpino R., Secci F., Ricci, P.C. A facile strategy for new organic white LED hybrid devices: design, features and engineering // *RSC Advances*. – 2016. – Vol. 6, No. 26. – P. 22111–22120.

49. Xiang H.F., Yu S.C., Che C.M., Lai P.T. Efficient white and red light emission from GaN/tris-(8-hydroxyquinolato) aluminum/platinum (II) mesotetrakis (pentafluorophenyl) porphyrin hybrid light-emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.* – 2003. Vol. 83, No. 3. – P. 1518–1520.

50. Park J.H., Kim J.Y., Chin B.D., Kim Y.C., Kim J.K., Park O.O. White emission from polymer/quantum dot ternary nanocomposites by incomplete energy transfer // *Nanotechnology*. – 2004. – Vol. 15, No. 9. – P. 1217–1220.

51. Bowers M.J., McBride J.R., Rosenthal S.J. White-light emission from magic-sized cadmium selenide nanocrystals // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2005. – Vol. 127, No. 44. – P. 15378–15379.

52. Jang E.P., Song W.S., Lee K.H., Yang H. Preparation of a photo-degradation-resistant quantum dot-polymer composite plate for use in the fabrication of a high-stability white-light-emitting diode // *Nanotechnology*. – 2013. – Vol. 24, No. 4. – P. 045607.

53. Wang M.S., Guo S.P., Li Y., Cai L.Z., Zou J.P., Xu G., ... Guo G.C. A direct white-light-emitting metal-organic framework with tunable yellow-to-white photoluminescence by variation of excitation light // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2009. – Vol. 131, No. 38. – P. 13572–13573.

54. He J., Zeller M., Hunter A.D., Xu Z. White light emission and second harmonic generation from secondary group participation (SGP) in a coordination network // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2012. – Vol. 134, No. 3. – P. 1553–1559.

55. Sava D.F., Rohwer L.E., Rodriguez M.A., Nenoff T.M. Intrinsic broad-band white-light emission by a tuned, corrugated metal-organic framework // *J. Amer. Chem. Soc.* – 2012. – Vol. 134, No. 9. – P. 3983–3986.

56. Sun C.Y., Wang X.L., Zhang X., Qin C., Li P., Su Z.M., Li J. Efficient and tunable white-light emission of metal-organic frameworks by iridium-complex encapsulation // *Nature Comm.* – 2013. – 4. – AN2717.





**Лапина Виктория Алексеевна,** кандидат хим. наук. Окончила в 1975 г. химический факультет Харьковского университета. Ведущий научный сотрудник Института физики им.

Б.И. Степанова НАН Беларуси. Область научных интересов: нанотехнологии и наноматериалы



**Першукевич Петр Павлович,** кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1973 г. физический факультет БГУ. Старший научный сотрудник Института физики им.

Б.И. Степанова НАН Беларуси. Область научных интересов: молекулярная и атомная физика, спектроскопия



**Трофимов Алексей Владиславович,** доктор хим. наук. Окончил в 1988 г. факультет молекулярной и химической физики МФТИ. Заведующий лабораторией Института биохимической физики им.

Н.М. Емануэля РАН. Область научных интересов: люминесценция, фотохимия, окислительный стресс



**Трофимова Наталья Николаевна,** кандидат биол. наук. Окончила в 1991 г. географо-биологический факультет МОПИ. Старший научный сотрудник Института биохимической физики им.

Н.М. Емануэля РАН. Область научных интересов: экспериментальная и теоретическая фотофизиология



**Цаплев Юрий Борисович,** доктор техн. наук, старший научный сотрудник. Окончил в 1977 г. физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. Ведущий научный сотрудник Института биохимической физики им.

Н.М. Емануэля РАН. Область научных интересов: люминесценция, фотохимия

## BL Group освещает Садовое кольцо

Холдинг *BL Group* («БЛ ГРУПП») выполнил проектную поставку более 3000 светильников ТМ «*GALAD*» и свыше 500 кронштейнов и опор ТМ «*OPORA ENGINEERING*» для освещения Садового кольца в Москве.

Освещение Садового кольца – знаковый проект для всего холдинга *BL Group* и результат эффективной совместной работы предприятий, входящих в его состав.



Специально для этого проекта конструкторы Холдинга разработали, а Лихославльский завод «Светотехника» изготовил уникальный консольный светильник со светодиодами «*GALAD Волна LED RAL7037*». Компания «БЛ ТРЕЙД» поставила светотехническое оборудование в срок. Все работы были проведены высокопрофессионально и качественно.

Проект был выполнен в рамках программы благоустройства Садового кольца, где переплетается история и современность. В результате реконструкции на исторических зданиях были установлены новые системы архитектурного освещения, а на улицах – прожекторы и современные консольные светильники. 870-летие Москвы самая большая историческая улица в центре столицы встречает новыми огнями.

bl-g.ru  
07.09.2017

## В 2017 г. рост потребности в СД замедлился

Сильный рост доходов от производства светодиодов (СД), предназначенных для освещения «общего назначения», в период 2007–2014 г. был обусловлен тем, что потребители переходили от освещения лампами накаливания и люминесцентными на освещение СД. Однако снижение цен из-за конкуренции и перехода на менее надёжные недорогие *SMD* (корпусированные) СД серии 2835 привело к падению доходов на 9% в 2015 г. и на 1% в 2016 г.

Ожидается, что с 2017 г., благодаря урегулированию цен, будет наблюдаться рост этих доходов на 3%. В 2017 г. автомобильный и информационный сектора применения *SMD* СД растут теми же темпами, что и сектор освещения, и, согласно прогнозам, в каждом из них доходы будут на \$200 млн выше, чем в 2016 г. Более того, ожидается быстрый рост сельскохозяйственного применения СД, хотя в долларовом выражении он будет ниже, чем в автомобильном, информационном и осветительном секторах.

При этом ожидается, что в 2017 г. доходы от производства *SMD* СД для автомобильной отрасли (в фарах, подфарниках, поворотниках, фонарях заднего хода, салонных светильниках и т.д.) возрастут на 9,2%, с \$1,9 млрд до \$2,1 млрд а для отрасли информационной (в полноцветных дисплеях, видеостенах, дорожных указателях, светофорах и др.) – на 11, 5%, с \$1,8 млрд до \$2,0 млрд.

Рынок сельскохозяйственного применения *SMD* СД не столь велик, но в процентном выражении растёт в 2017 г. даже быстрее автомобильного и информационного.



Что же касается среднегодового темпа роста доходности производства *SMD* СД для освещения, то всё ещё ожидается, что в 2016–2022 гг. он будет несколько ниже (6,1%), чем для автомобильной (7,9%) и информационной (8,5%) отраслей.

Производители СД уже не связывают свои успехи исключительно с *SMD* СД для освещения. Сегодня большинство из них уже включили в область своих интересов и автомобильную, и информационную, и сельскохозяйственную отрасли или же собираются это сделать. Эра специализации завершилась: сейчас все занимаются всем.

Для компенсации замедления роста потребности в СД производители увеличивают выпуск ИК- и УФ-диодов для формирования новых источников прибыли. Кроме того, наблюдается начавшаяся несколько лет назад тенденция к постепенной вертикальной интеграции производителей СД, которые начинают продавать СД модули, а иногда и СД лампы.

compoundsemiconductor.net  
27.08.2017