

**Д.Н. Хмиль, А.М. Камуз, П.Ф. Олексенко, В.Г. Камуз,
Н.Г. Алексенко, О.А. Камуз, С.У. Хабусева¹, Л.Д. Паценкер¹**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ОРГАНО- НЕОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОЛЮМИНОФОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

Проанализированы существующие к настоящему времени технологии повышения индекса цветопередачи белых светодиодов. Показано, что только при использовании очень высокотехнологических и очень дорогостоящих установок удастся синтезировать неорганические люминофоры, которые позволяют повысить индекс цветопередачи (CRI) белых светодиодов до 98. В работе предложен простой способ повышения индекса передачи цвета за счет использования органо-неорганических фотолюминофоров. Показано, что эта комбинация позволяет повысить CRI до 96.

Ключевые слова: белый светодиод, фотолюминофор, индекс цветопередачи.

1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрая и масштабная замена традиционных ламп накаливания и люминесцентных источников света более эффективными стала возможной благодаря использованию энергосберегающих белых светодиодов. Их эффективность на начало 2014 года составила 303 лм/Вт [1].

В большинстве случаев в белых светодиодах используются фотолюминофоры на основе гранатов, которые имеют большую эффективность, но вместе с тем они имеют и существенные недостатки. Один из таких недостатков – слабая интенсивность фотолюминесценции на длинах волн 490–510 и 600–780 нм. Поскольку передача цветов источниками света зависит от тех цветов, которые присутствуют в их спектре излучения, то очевидно, что при использовании белых светодиодов на основе гранатового фотолюминофора освещаемые объекты будут иметь ненасыщенный цвет. Другими словами, их индекс цветопередачи (CRI) будет ниже 100, а в случае гранатового фотолюминофора порядка 75.

Минимально приемлемое значение CRI источника света зависит от области его применения.

- Источники света с CRI в диапазоне 90–100 требуются в помещениях, где точная цветопередача является критически важной, например, в художественных студиях, в хирургии, в магазинах по продаже тканей и произведений искусства.
- Источники света с CRI в диапазоне 70–90 можно использовать в офисных, образовательных, медицинских и других рабочих и жилых помещениях.
- Источники света с CRI около 50 могут использоваться, где точная цветопередача не имеет большого значения (производственные, охранные и складские помещения).

Ясно, что устранение вышеназванных «провалов» интенсивности в спектре белого светодиода с неорганическим фотолюминофором является актуальной задачей в области разработки современных белых светодиодов. В этой связи в последнее время активно разрабатываются новые технологии повышения CRI белых светодиодов (CRI свыше 90) при коррелированной цветовой температуре 2700 – 6000 К.

2. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ ИНДЕКСА ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ БЕЛЫХ СВЕТОДИОДОВ

К настоящему времени опробованы следующие основные технологии повышения индекса цветопередачи белых светодиодов.

- *Смешивание излучений светодиодных чипов различного цвета.* Суть заключается в добавлении к RGB светодиоду дополнительных чипов, например, чипа с голубым цветом излучением (RGCB светодиод). Индекс цветопередачи трех цветных источников света может быть порядка 80, в то время как индекс четырехцветных источников света может превышать 90. Такой метод создания белого светодиода требует приложения к каждому светодиоду контрольно-регулирующих токовых схем, что значительно повышает его стоимость [2].

- *Замещение части ионов иттрия или алюминия в матрице иттрий-алюминиевого граната атомами переходных металлов.* При замещении в иттрий-алюминиевом гранате с общей формулой $Y_{3-x}(TR)_xAl_{5-y}Ga_yO_{12}:Ce^{3+}$ (TR = Gd, Pr) части (x) ионов иттрия или части (y) атомов Al атомами переходных металлов (например, гадолиния или празеодима) происходит изменение его спектра люминесценции [3]. При добавлении Gd происходит смещение максимума полосы люминесценции от 530 до 590 нм. А при добавлении в состав люминофора редкоземельных металлов (Dy, Pr) в спектре излучения люминофора возникает пик в красной области (695,5 нм). Такой подход позволил повысить CRI белого светодиода с 72 до 85 [4, 5].

- *Использование в светодиодных модулях нескольких белых светодиодов, имеющих индекс цветопередачи 75, совместно с жёлтым светодиодом.* Изменение электрических токов питания светодиодов позволяет в широких пределах менять соотношение интенсивностей излучения белых и жёлтого светодиодов и соответственно менять индекс цветопередачи модуля в диапазоне 75–82 [6, 7].

- *Использование смеси двух неорганических люминофоров для покрытия чипа синего светодиода* [3,5]. Например, к жёлтому фотолюминофору ($Y_3Al_5O_{12}:Ce$) добавляют красный для заполнения «провала» 600–780 нм [8]. Это приводит к повышению CRI светодиода. Но при этом сильно повышаются стоковые потери излучения в красном люминофоре, что сильно понижает световую эффективность белого светодиода.

- *Одновременное использование в одном модуле чипа синего светодиода, покрытого зелёным фотолюминофором (EQ-White светодиод), и чипа красного светодиода.* В так называемом гибридном светодиоде происходит смешивание в одном корпусе излучений красного светодиода и EQ-White светодиода. Белый EQ-White светодиод имеет высокую световую эффективность и малое CRI, в то время как красный светодиод имеет тоже высокую световую эффективность, но очень низкое CRI. При таком подходе можно получить световую эффективность гибридного светодиода равную 110 лм/Вт и CRI больше 90 [9]. Имеющиеся в продаже гибридные белые светодиоды могут иметь коррелированную цветовую температуру в диапазоне от 2700 до 4000 К.

3. СУТЬ МЕТОДА И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе предлагается метод повышения индекса цветопередачи белых светодиодов на основе неорганических фотолюминофоров путем использования в них органических фотолюминофоров. Суть метода состоит в использовании излучений органических фотолюминофоров для заполнения спектральных «провалов» в областях 490–510 и 580–780 нм.

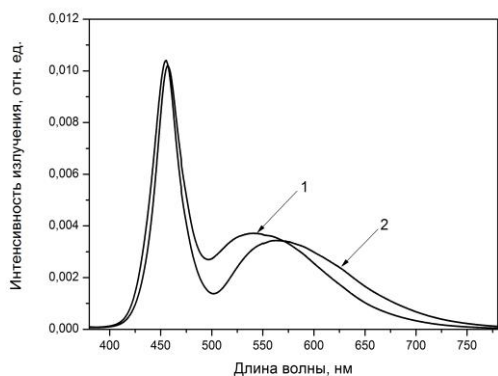


Рис. 1. Спектры излучения синего светодиода, покрытого пленками с неорганическими фотолюминофорами: 1 – ФЛЖ-7-01, 2 – ФЛЖ-7-21.

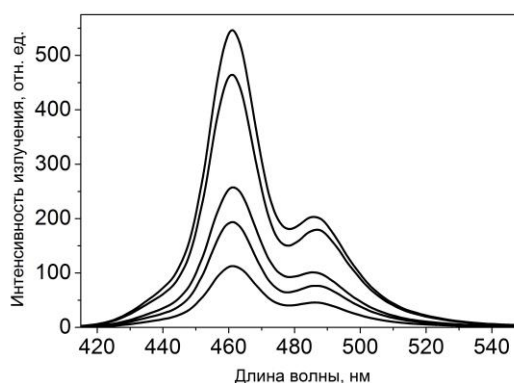


Рис. 2. Спектр излучения синего светодиода и полимерных пленок с разной концентрацией органического фотоллюминофора Dy6-083.

Гибридная органо-неорганическая пленка создавалась путем объединения пленок с неорганическими и органическими фотоллюминофорами. На пленку из неорганического фотоллюминофора наносилась полимерная пленка с органическим фотоллюминофором. В связи с тем, что основной вклад в создание фотоллюминесценции вносит неорганический фотоллюминофор, пленка из него размещается первой на пути следования излучения от чипа синего светодиода. Для проведения исследований изготавливали пленки с неорганическими фотоллюминофорами – ФЛЖ-7-01 и ФЛЖ-7-21, – максимумы фотоллюминесценции которых составляли соответственно 540 та 565 нм (рис. 1). Эти пленки имели толщины от 100 до 500 мкм при одинаковой концентрации (20%). Органические фотоллюминофоры Dy6-083 и Op.164 были разработаны и изготовлены в ГНУ НТК «Институт монокристаллов» НАНУ (г. Харьков). Фотоллюминофор Dy6-083 разработан для повышения интенсивности на длинах волн 480–510 нм (рис. 2), а Op.164 – для длин волн 580–780 нм (рис. 3).

Полимерные пленки имели разные концентрации органических фотоллюмино-форов (0,001–3%) и разные толщины (100–500 мкм).

Исследование гибридных органо-неорганических пленок проводили по опти-ческой схеме, представленной на рис. 4. В результате исследований гибридных органо-неорганических пленок с исполь-зованием ФЛЖ-7-01 или ФЛЖ-7-21 вместе с Dy6-083

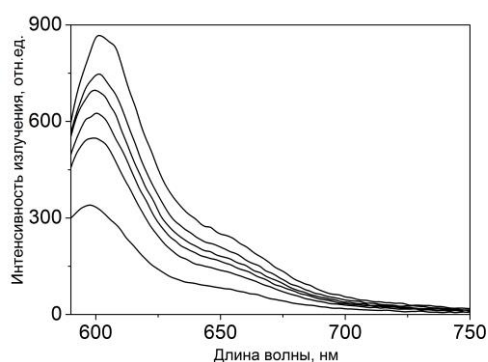


Рис. 3. Спектр излучения полимерных пленок с различной концентрацией органического люминофора Op.164.

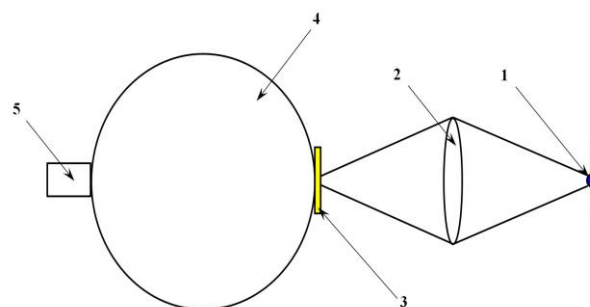
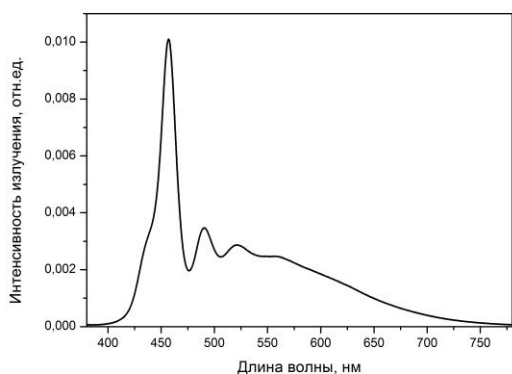
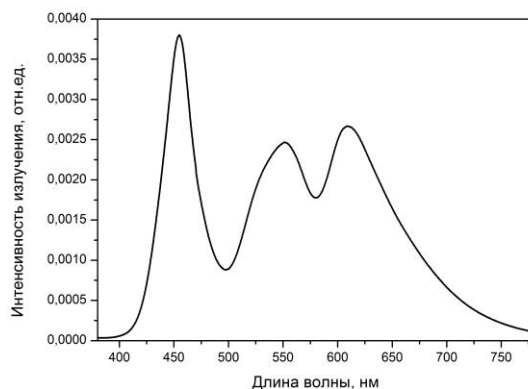


Рис. 4. Оптическая схема для исследования гибридных органо-неорганических композитных пленок: 1 – источник возбуждения – синий светодиод (460 нм), 2 – линза, 3 – исследуемая гибридная органо-неорганическая композитная пленка, 4 – интегрирующая сфера 0,3м, 5 – оптическое волокно приемника спектро-радиометра НААС-2000.



а



б

Рис. 5. Спектры излучения синего светодиода с гибридными органо-неорганическими пленками: а) ФЛЖ-7-01 + Dye-083, б) ФЛЖ-7-21+ Op.164.

удалось получить индекс цветопередачи порядка 91 при коррелированной цветовой температуре более

4500 К (рис. 5, а). При добавлении Op.164 к ФЛЖ-7-01 или ФЛЖ-7-21 удалось повысить CRI до 94 при коррелированной цветовой температуре более 3500 К (рис. 5, б). Следует отметить, что в последнем случае частный индекс цветопередачи R_9 достигал значения 92.

Следующим этапом исследований было изучение возможности заполнения спектральных «провалов» одновременно в областях 480–510 и 580–780 нм путем добавления полимерных пленок обоих органических фотолюминофоров Dye-083 и Op.164 к пленкам с неорганическими фотолюминофорами ФЛЖ-7-01 и ФЛЖ-7-21. Результаты исследований показали, что такой подход позволяет повысить индекс передачи цвета до 96 при коррелированной цветовой температуре выше 4000 К (рис. 6).

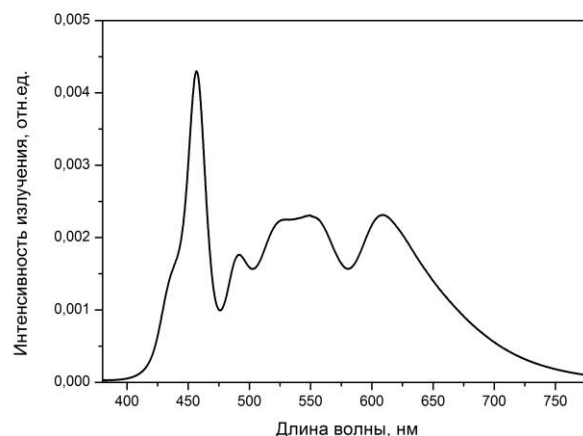


Рис. 6. Спектр излучения гибридной органо-неорганической композитной пленки с использованием ФЛЖ-7-21 + Op.164 + Dye-083.

4. ВЫВОДЫ

- Разработан простой и дешевый способ повышения индекса цветопередачи белых светодиодов.
- Применение органических фотолюминофоров Dye-083 и Op.164 позволяет повысить индекс цветопередачи белого светодиода до 96.
- Предложенный способ позволяет создавать белые светодиоды с $CRI > 90$ при коррелированной цветовой температуре от 3500 до 6500 К.

**D.N. Khmil, A.M. Kamuz, P.F. Oleksenko, V.G. Kamuz, N.G. Aleksenko,
O.A. Kamuz, S. U. Habuseva, L.D. Patsenker**

**THE USE OF HYBRID ORGANIC-INORGANIC PHOTOLUMINOPHORS
FOR IMPROVING THE COLOR RENDERING INDEX OF WHITE LEDS**

Existing technologies for the improving the color rendering index of white LEDs were analyzed. It is shown that only by using very high-tech and very expensive installations it is possible to synthesize inorganic luminophors that will improve the color rendering index (CRI) of white LEDs to 98. In this paper we propose a simple way to improve the color rendering index through the use of organic-inorganic photoluminophors. It has been shown that this combination provides CRI values ~ 96.

1. <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier> – 23 октября 2014.
2. Шуберт Ф. Светодиоды. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – С. 295-412.
3. Коган Л.М., Гальчина Н.А., Рассохин И.Т. и др. Спектры излучения осветителей белого свечения и осветители на их основе // Светотехника. – 2005. – №1. – С. 15-17.
4. Бадгутдинов М.Л., Коробов Е.В., Лукьянов Ф.А. и др. Спектры люминесценции, эффективность и цветовые характеристики светодиодов белого свечения на основе р-п-гетероструктур InGaN/GaN, покрытых люминофорами // Физика и техника полупроводников. – 2006. – том 40, вып. 6. – С. 758-763.
5. Pat. 2006006002 WO, Wave length shifting compositions for white emitting diode systems / Vladimir Abramov, Naum Soschin, Valery Sushkov et al. – 19.01.2006.
6. Бадгутдинов М.Л., Гальчина Н.А., Коган Л.М. и др. Светодиодный модуль с регулируемой цветовой температурой // Светотехника. – 2008. – №6. – С. 15-17.
7. Борискина А.А., Коваленко О.Ю., Пильщикова Ю.А. Светодиодный прибор улучшенной цветопередачи // Фундаментальные исследования. – 2013. – №4. – С. 1054-1058.
8. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/neff_colorconversion_sandiego2014.pdf – 23 октября 2014.
9. http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00102493_0.pdf/Brilliant%20Mix%20-%20Professional%20White%20for%20General%20Lighting.pdf – 23 октября 2014.

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины
проспект Науки, 41
03028 Киев

Получено 28.05.2014

¹ГНУ НТК «Институт монокристаллов»
НАН Украины
проспект Ленина, 60
61001 Харьков