

УДК 628.9

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА НА ПРИНЦИПЕ RGB СМЕШЕНИЯ С ВЫСОКИМИ ИНДЕКСАМИ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ

© 2014 Н.А. Тальнишних, А.Е. Черняков, А.В. Аладов, А.Л. Закгейм

Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур
РАН, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 30.11.2014

В статье рассматриваются особенности работы светодиодных источников света на принципе RGB-смешения, допускающих динамическое управление по спектру (цвету) излучения. Продемонстрирована возможность синтеза белого света в диапазоне цветовых температур $T_c = 2700-10000$ К при высоких индексах цветопередачи R_1-R_{14} . Приводятся выявленные особенности и варианты оптимизации спектрально-цветовых характеристик.

Ключевые слова: полупроводниковый излучатель, светодиод, RGB-смешение, индекс цветопередачи, источник света, интеллектуальный свет

Освещение играет важную роль в жизни человека. Известно, что недостаточное или избыточное, с неправильно-выбранным цветовым составом оно может вести к различного рода проблемам со здоровьем, начиная от простейшего переутомления и заканчивая серьезными заболеваниями органов зрения, мозга, нервной системы. Повсеместно используемые в мире лампы накаливания, люминесцентные и галогенные обладают невысокими значениями световой отдачи, могут перегреваться и загрязнять окружающую среду. К тому же все типы ламп, кроме ламп накаливания, обладают линейчатым спектром, что в свою очередь ведет к искажению цветопередачи. По этим показателям они проигрывают светодиодным (СД) лампам, известным отличающимися на порядки большим сроком службы и высокой светоотдачей. Кроме того, использование СД позволяет создавать источники «интеллектуального» или «настраиваемого» света на основе полихромных матриц, работающих на принципе цветосмешения (RGB), что практически недоступно для других типов ламп в силу особенностей их работы. Управляемость по спектру (или цвету) кардинально расширяет

функциональные возможности источников света, позволяя создавать оптимальную для жизнедеятельности световую среду [1, 2]. Степень управляемости может быть разной: от варьирования во времени в определенном диапазоне цветовой температуры (T_c) до воспроизведения широкой гаммы естественных цветов, включающей миллионы цветовых оттенков. Это выводит на первый план проблему качества цветопередачи. По современным требованиям для высококлассного освещения общий индекс цветопередачи R_a (CRI) должен быть не менее 95, а специальные индексы цветопередачи для насыщенных цветов R_9-R_{14} , по крайней мере, не ниже 85 [3].

Рассмотрим подробнее особенности работы СД источников света на принципе RGB-смешения, допускающих динамическое управление по спектру (цвету) излучения, а также способы изменения их спектрально-цветовых характеристик.

Объекты и методика исследования. В работе исследовался СД источник света на принципе RGB-смешения, состоящий из белого люминофорного СД фирмы Cree, серии XQB, с цветовой температурой (T_c) 2800 К, корректируемого добавлением излучения трех монохроматических СД фирмы Cree, серии XQE, с длинами волн излучения 520 нм, 620 нм и 473 нм. Был проведен комплекс спектрорадиометрических и колориметрических исследований. Указанные измерения, а также вычисления внешнего квантового выхода, световой эффективности и ватт - амперных характеристик, пиковой длины волны λ_{peak} , доминантной длины волны λ_{dom} ,

Тальнишних Надежда Андревна, стажер-исследователь. E-mail: nadya.fel@mail.ru

Черняков Антон Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник. E-mail: chernyakov.anton@yandex.ru

Аладов Андрей Вальменович, старший научный сотрудник. E-mail: aaladov@mail.ioffe.ru

Закгейм Александр Львович, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий сектором оптоэлектронных приборов. E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru

ширины спектра по уровню половины интенсивности $\Delta\lambda_{0,5}$, а также T_c , R_a и R_1-R_{14} , проводились на установке «OL770-LED» фирмы Optronic Laboratories (рис. 1), с использованием встроенного программного обеспечения в соответствии с Международными стандартами [4]. Светодиод в корпусе помещался в интегрирующую сферу. На светодиод подавалось напряжение от программируемого прецизионного источника питания «OL

700-10-2000» в прямом направлении. Излучение регистрировалось мультисканальным спектрометрическим прибором «OL 770 VIS/NIR». Вся измерительная установка полностью компьютеризирована. Спектрометр «OL 770 VIS/NIR» со встроенной 100 мкм щелью обеспечивает регистрацию длин волн излучения светодиодов в диапазоне 380-1100 нм с точностью $\pm 0,1$ нм.

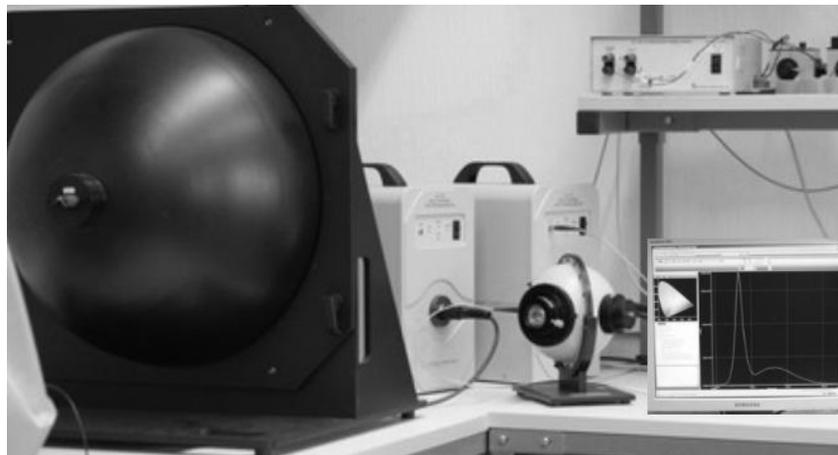


Рис. 1. Комплекс для исследования спектрометрических и колориметрических параметров «OL770-LED» фирмы Optronic Laboratories

Экспериментальная часть. Вопросы оптимизации цветосмещения для получения белого света с заданной цветовой температурой и оптимальным компромиссом в соотношении «световая отдача – индекс цветопередачи» применительно к СД подробно исследовались в последнее десятилетие [5-9]. Один из главных полученных результатов кратко заключается в следующем: при типичной полуширине спектров полупроводниковых излучателей $\Delta\lambda_{0,5} \sim 15-40$ нм получение белого света с высоким значением общего индекса цветопередачи $R_a > 95$ требует сложения излучения 4-5-ти полупроводниковых излучателей с пиковыми длинами волн λ_{peak} , относительно равномерно распределенных в видимом диапазоне. Дальнейшее, более плотное заполнение спектра излучения абсолютно черного тела (АЧТ) за счет увеличения числа СД, мало что добавляет к значению R_a , но ведет к заметным потерям световой отдачи и усложнению системы. В то же время, даже небольшое отклонение λ_{peak} отдельных СД от оптимальных значений может приводить к резкому падению отдельных индексов цветопередачи, особенно R_9-R_{14} , относящихся к насыщенным цветам. Использование для цветосмещения люминофорных СД с более широким спектром $\Delta\lambda_{0,5} \sim 70-100$ нм, естественно, облегчает проблему.

В ходе эксперимента была поставлена задача: варьируя спектральные доли мощности

различных СД, найти полный спектр излучения комбинированного источника света и провести его анализ, то есть, определение цветковых координат спектра x, y , коррелированной цветовой температуры T_c , общего R_a и специальных индексов цветопередачи R_1-R_{14} , а также световой отдачи лм/Вт.

Экспериментальные исследования показывают, что для синтеза высококачественного белого света в широком диапазоне T_c достаточно использования белого люминофорного СД, с проведением коррекции при помощи трех цветных СД. Причем этот способ позволяет подбирать оптимальные условия для получения света с требуемым набором T_c . Существует возможность влияния на частные индексы цветопередачи, что делает такие приборы подходящими для применения в качестве источников контрастного освещения для лучшей визуализации объекта. Например, в хирургии и диагностике для улучшения идентификации тканей различной морфологической структуры, а также для четкого различия нормальных и патологических тканей во время операции. Исходные спектральные распределения светодиодов использованных в мультиспектральном полихромном СД модуле показаны на рис. 2. На рис. 3 отображен разброс R_a (CRI) и R_1-R_{14} для белых люминофорных СД с одной T_c .

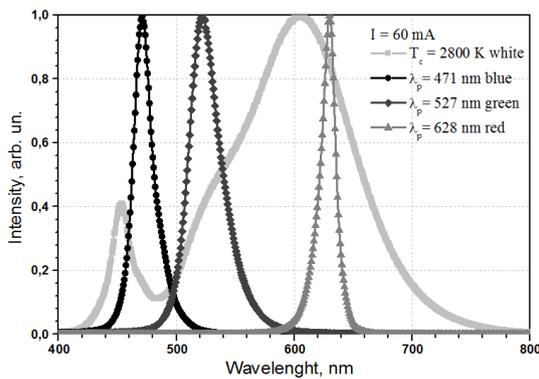


Рис. 2. Спектральное распределение составляющих, использованных в мультичиповом полихромном СД модуле

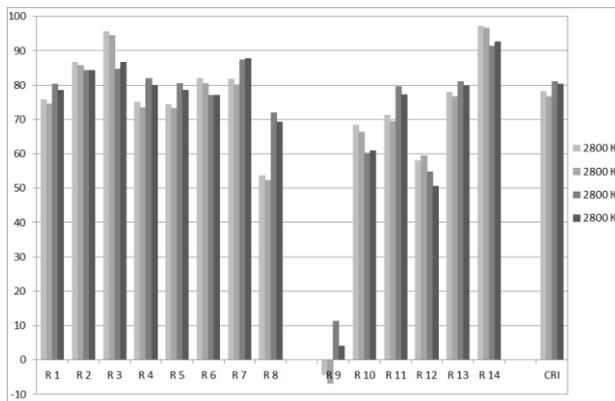


Рис. 3. Разброс общего (CRI) и специальных (R_1 - R_{14}) индексов цветопередачи для белых люминофорных СД с одной T_c

Экспериментальные данные, отраженные на рис. 4-7, иллюстрируют влияние спектральных составляющих излучения на R_a (CRI) и R_1 - R_{14} . Хорошо видно, что незначительное изменение доли хотя бы одной составляющей излучения в общем спектре может значительно изменить R_a в пределах 69-97. Особенно важно, что для специальных индексов также наблюдаются значительные перепады. Например, на R_9 с 50 до 93, а на R_{13} с 70 до 98. Не смотря на то, что значения R_9 - R_{14} не учитываются при расчете R_a , они играют существенную роль при воспроизведении цвета биологических тканей. Данные, представленные на графиках, обобщены в табл. 1.

Выводы: исследованы способы цветосмешения в светодиодных источниках света на основе белых люминофорных СД с коррекцией тремя цветными - монохроматическими, позволяющие синтезировать белый свет с высокими общим и частными индексами цветопередачи. Подобные источники света представляют большой интерес, как для общего освещения, так и для ряда специальных применений: архитектурно-художественной подсветки, освещения операционных, микроскопии, фототерапии, коррекции психофизиологического состояния человека, агротехники и т.д. Рассмотрено влияние изменения соотношений составляющих спектра излучения, оказываемое на выходные характеристики таких источников. Приведены варианты оптимизации световых характеристик.

Таблица 1. Цветовые характеристики синтезируемого света

T_c , К	CRI	R_9	R_{12}	R_{13}	P_r , %	P_g , %	P_b , %	P_{ws} , %	lm/W
4000	91,38	91,65	78,69	89,66	8	3	8	81	115
4000	88,53	50,76	76,03	98,67	0	5	8	87	110
4000	92,77	74,66	77,2	96,8	4	7	7	82	114
5000	85,1	51,22	63,29	75,69	8	13	17	62	117
5000	85,1	93,39	70,1	87,87	4	8	14	74	111
6500	93,82	86,1	64,02	98,22	6	5	6	83	119
6500	83,39	13,27	54,39	84,9	0	0	3	97	119

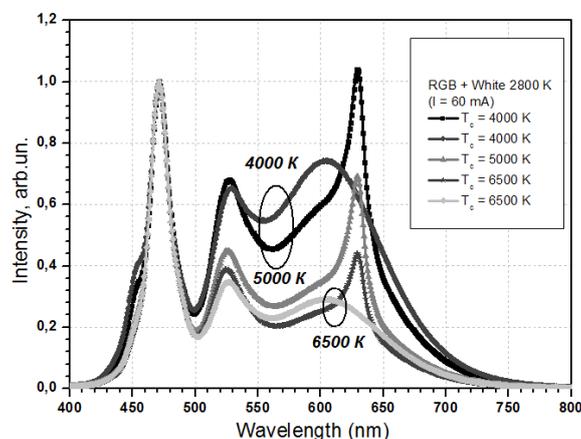


Рис. 4. Общий спектр синтезированного белого света полихромного СД источника для нескольких цветовых температур

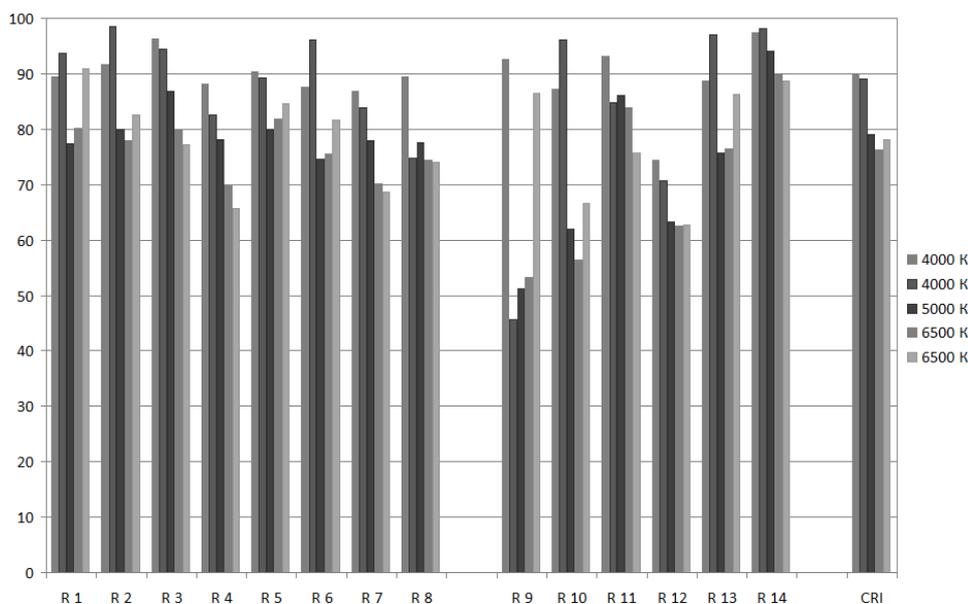


Рис. 5. Общий (CRI) и специальные (R_1 - R_{14}) индексы цветопередачи полихромного СД источника для нескольких цветовых температур

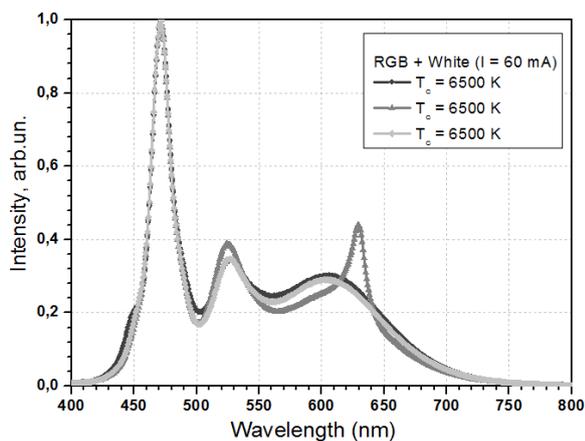


Рис. 6. Спектры полихромного СД источника для $T_c = 6500$ К

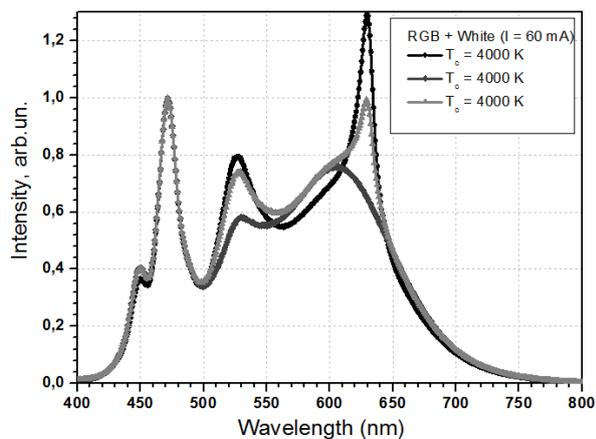


Рис. 7. Спектры полихромного СД источника для $T_c = 4000$ К

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Закгейм, А.Л.* Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья человека // Светотехника. 2012. №6. С. 12-21.
2. Philips HUE lamp offers tunable color. URL: <https://www.meethue.com/en-US#lightrecipes>
3. LED Engin Achieves Highest Color Rendering in World's Smallest LED Emitters for High-End Directional Lighting/. LED Professional Review LpR 37 | May/June 2013, p.28. URL: www.led-professional.com/products/leds_led_modules/led-engin-achieves-highest-color-rendering-in-world2019s-smallest-led-emitters-for-high-end-directional-lighting
4. IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. – New York: The Illuminating Engineering Society of North America, 120 Wall Street, New York 10005. 2007.
5. *Zukauskas, A.* Optimization of white polychromatic semiconductor lamps / A. Zukauskas, R. Vaicekauskas, F. Ivanauskas et al. // Appl. Phys. 2002. Lett. 80. P. 234.
6. *Chhajed, S.Y.Xi.* Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes / S.Y.Xi. Chhajed, Y.-L. Li, Th. Gessmann, E.F. Schubert // J. Appl.Phys. 2005. V.97. P. 054506?
7. Ohno, Y. Spectral design considerations for white LED color rendering // Optical Engineering 2005. V. 44 (11). 111302.
8. *Елисеев, Н.П.* О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов / Н.П. Елисеев, С.П. Решенов // Светотехника. 2012. № 4. С. 12-18.
9. *Гутцайт, Э.М.* Анализ спектральных характеристик светодиодных модулей для воспроизведения стандартных источников света / Э.М. Гутцайт, А.Л. Закгейм, Л.М. Коган и др. // Сборник статей 9-го Белорусско-Российского семинара «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». – Минск, 28-31 мая 2013 г. С.186-190.

RESEARCH OF LED LIGHT SOURCES ON THE PRINCIPLE OF RGB MIXING WITH HIGH COLOR RENDERING INDEXES

© 2014 N.A. Talnishnikh, A.E. Chernyakov, A.V. Aladov, A.L. Zakgeym

Scientific and Technological Center of Microelectronics and Submicronic
Heterostructures RAS, St. Petersburg

In article features of LED light sources work on the principle of RGB mixing allowing the dynamic management on spectrum (color) of light are considered. Possibility of synthesis of white light in the range of color temperatures of $T_c = 2700-10000$ K at high color rendering indexes R_1-R_{14} is shown. The revealed features and options of optimization the spectral and color characteristics are given.

Key words: *semiconductor emitter, LED, RGB mixing, color rendering index, light source, intellectual light*

*Nadezhda Talnishnikh, Trainee Researcher. E-mail:
nadya.fel@mail.ru*

*Anton Chernyakov, Candidate of Physics and Mathematics,
Research Fellow. E-mail: chernyakov.anton@yandex.ru*

*Andrey Aladov, Senior Research Fellow. E-mail:
aaladov@mail.ioffe.ru*

*Alexander Zakgeim, Candidate of Technical Sciences, Deputy
Director of Scientific Work, Chief of the Optoelectronic
Devices Sector. E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru*