

ПРОБЛЕМЫ, КОМПРОМИССЫ И ТЕНДЕНЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

академик НАНБ А.П. Достанко, А.В. Беляев, к.т.н. В.П. Василевич,
Е.Д. Воротницкий, В.С. Грицкевич, О.Н. Дубина, А.В. Чумаков

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Введение

Сегодня вся вырабатываемая в мире электроэнергия расходуется на электроприводы (50–52%), источники тепла и холода (15–17%), телекоммуникации (13–15%) и освещение (17–20%). Таким образом, электрическое освещение является одним из наиболее энергоемких в структуре мирового энергопотребления[1].

В настоящий момент на мировом рынке светотехники и средств отображения информации активно развивается направление твердотельных источников света (Solid State Light, SSL), которые благодаря ряду преимуществ уверенно вытесняют традиционные источники света, достигшие своих предельных параметров уже за столетнюю историю развития.

К SSL-устройствам относятся два вида светоизлучающих диодов: неорганические (Light Emitting Diodes, LED) и органические (Organic Light Emitting Diodes, OLED), соответственно. Тем не менее, в мировой тенденции развития SSL-устройств органические и неорганические светодиоды рассматриваются не как конкурирующие, а как взаимно дополняющие технологии. Благодаря низким эксплуатационным затратам и длительному сроку службы светодиоды являются лидерами в рейтинге источников света. Скорость, с которой светодиоды будут завоевывать рынок осветительных приборов, во многом зависит от их цены.

Целью работы является анализ принципов создания, современного состояния и перспектив развития интеллектуальных систем светодиодного освещения.

Задачи, решаемые при проектировании светодиодных систем освещения

Следует отметить, что только ценовой фактор, но и технические проблемы сдерживают развитие и внедрение светодиодных систем освещения, наиболее значимые из них следующие:

– принципиальная невозможность работы при повышенных температурах окружающей среды более 60–80 °С;

– в силу значительной нелинейности вольтамперной характеристики, белые светодиоды не могут непосредственно питаться от распространенных источников энергии и требуют для сохранения высокого КПД всей системы применения достаточно сложных специализированных источников питания (обычно, импульсных преобразователей-драйверов).

Для использования в системах освещения источники света должны обладать следующими свойствами: высокой эффективностью, высокой мощностью излучения, хорошей цветопередачей, высокой надежностью, низкой стоимостью производства и безопасностью для окружающей среды. Поскольку существующим светодиодам присущи эти свойства, они уже сегодня весьма успешно соперничают с традиционными осветительными приборами – флуоресцентными лампами и лампами накаливания.

Человеческий глаз воспринимает свет как белый, если все три группы рецепторов его сетчатки возбуждены в определенном соотношении. Физиологические аспекты систем освещения в последнее время достаточно хорошо изучены [2–5]. Координаты цветности белого света находятся в области, расположенной в центре цветовой диаграммы.

Создание белого цвета при помощи монохроматических излучателей видимого спектра, при этом три из них, основаны на излучении светодиодов двух, трех и четырех цветов. Однако, получить высококачественные источники белого света на принципе аддитивного смешения двух комплементарных (пространственно взаимодополняемых) цветов, пригодные для применения в осветительных системах, проблематично. Поэтому все высококачественные источники белого света построены, как правило, на принципе смешения трех и большего количества основных цветов точность передачи цвета [6].

Цветовосприятие человека сильно изменяется в зависимости от освещенности. При небольшой освещенности мы лучше видим синий и хуже красный. Поэтому для каждого уровня освещенности существует наиболее подходящий диапазон цветовой температуры источников света. Замечено, что с ростом температуры меняются координаты цветности многоцветных источников белого света, это происходит из-за температурных зависимостей мощности излучения, длины волны в максимуме излучения и ширины спектральных линий, что приводит к необходимости охлаждения светодиодов [7].

При выборе источника белого света всегда приходится искать компромисс между его цветопередачей и световой эффективностью излучения. Двухцветные источники белого света, как правило, имеют самые высокие значения световой эффективности, но при этом наихудшую цветопередачу. Трехцветные излучатели обладают приемлемыми параметрами цветопередачи ($CRI > 80$) и средними показателями световой эффективности (более 300 лм/Вт). Индексы цветопередачи четырехцветных источников белого света могут быть больше 90 [8].

Интеллектуальные («умные») системы освещения на основе светоизлучающих диодов (СИД) высокой яркости позволяют разработчикам контролировать цветовую температуру, поддерживать высокое значение коэффициента цветопередачи для приложений с белым светом, способны обеспечивать высокоточное освещение широкого спектра.

Большинство интеллектуальных светодиодных систем освещения построено на основе контроллера смешанного сигнала, драйверов постоянного тока и СИД высокой яркости. В обоих случаях используется многоканальная система управления СИД и, следовательно, при проектировании таких систем разработчикам придется иметь дело с такими проблемами как тщательный отбор светодиодов по цвету (биннинг), температурные эффекты, процессы старения и поддержка общей точности передачи цвета. Использование контроллера смешанного сигнала – эффективный метод решения этих задач.

Одной из важных особенностей таких систем является точная настройка параметров света. Раньше, при использовании традиционных источников света для освещения, регулировка света была связана с затемнением или управлением площадью рассеивания посредством оптической системы. В системах на основе СИД регулировка света связана с управлением нескольких различных характеристик света одновременно.

Такая гибкость сопровождается определенными сложностями и компромиссами в каждой системе освещения. Типовая интеллектуальная система освещения строится на базе структурной схемы, показанной на рис 1.

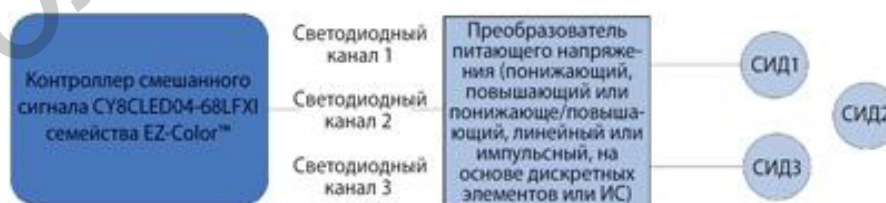


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы освещения [7]

В нее входят СИД высокой яркости, преобразователь системы питания и контроллер смешанного сигнала. Вначале следует выбрать светодиоды. Большинство поставщиков, включая компании Lumileds, Cree, Nichia и Osram, предлагает светодиоды с широким рядом параметров: номинальное значение тока и мощности, площадь рассеивания, цвет свечения, КПД, размеры посадочного места, тепловые характеристики, бин-код и т.д. Перечень параметров одинаков для белых и цветных светодиодов, однако для белых СИД необходимо

также учитывать цветовую температуру и CRI. Оба эти параметра в большой степени зависят от люминофора покрытия СИД голубого цвета свечения.

Контроллер смешанного сигнала – важнейшая часть системы управления освещением. Управляемость и гибкость систем на основе СИД высокой яркости во многом обеспечиваются именно контроллером, способным компенсировать проблемы, которые возникают при регулировке света СИД. Для большинства приложений достаточной вычислительной мощностью обладают 8-разрядные микроконтроллеры, содержащие ОЗУ или флэш-память.

Для цифровой периферии весьма важным является число специализированных каналов регулировки яркости свечения и их разрешение, а также способность реализации различных коммуникационных интерфейсов. Каналы регулировки яркости используются для управления понижающими преобразователями. Они могут быть также реализованы на основе программных счетчиков. Однако программные каналы регулировки яркости используют ресурсы процессора, которые могут обеспечивать выполнение других полезных функций. В интеллектуальных системах освещения обычно используется 8-разрядное разрешение для достижения хорошей точности передачи цвета, но в высококачественных системах может использоваться и 16-разрядное разрешение. Для большинства приложений 8-разрядное разрешение обеспечивает необходимую точность, и разработчики обычно используют более высокое разрешение для достижения лучшей линейности регулировки яркости при малых выходных уровнях.

Компараторы и усилители с программируемым коэффициентом усиления позволяют реализовать простую топологию системы питания. Большинство поставщиков микроконтроллеров предлагает некоторые или все перечисленные виды периферии, однако необходимо учитывать, что при изменении системных требований набор нужной для реализации проекта периферии также можно изменить. Разработка интеллектуальной системы освещения на основе СИД высокой яркости является сложной задачей. Для систем, где требуется сверхвысокая производительность, за реализацию которой заказчик готов платить, хорошим решением было бы использование FPGA. Однако в системе на их основе, кроме того, должны использоваться дополнительные аналоговые компоненты. Наибольшую гибкость обеспечивают контроллеры с конфигурируемой периферией и настраиваемыми портами ввода/вывода.

Проблема достижения высокого качества белого света

Для систем белого света нужно учитывать цветовую температуру и коэффициент цветопередачи CRI. Цветовая температура – это цвет, соотношенный с линией цветностей черного тела, или кривой излучателя Планка на цветовой шкале, утвержденной Международной комиссией по освещению CIE в 1931 г. (рис. 2).

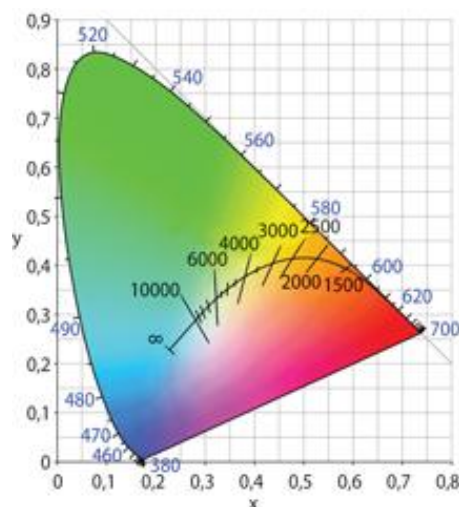


Рис. 2. Кривая излучателя Планка и цветовая температура [7]

Например, черное тело, нагретое до температуры 2500 К, рассматривается как излучатель довольно теплого белого света, а нагретое до 7000 К – как излучатель холодного света. Системы на основе СИД высокой яркости в действительности не могут обеспечить цвета в соответствии с кривой излучателя Планка, и для измерения их характеристик используется относительная цветовая температура (Correlated Color Temperature – CCT).

Коэффициент цветопередачи – параметр, используемый для описания качества белого света путем сравнения передачи различных цветов данным и эталонным источником света. Как цветовую температуру, так и коэффициент цветопередачи можно настроить путем выбора соответствующего СИД, используя нужный канал СИД и управляя этими каналами с помощью контроллера смешанного сигнала.

Система белого освещения, содержащая только белые СИД, имеет ограничения по цветовой температуре, однако обеспечивает достаточно высокий коэффициент цветопередачи при данной цветовой температуре белых светодиодов. Поскольку коэффициент цветопередачи сильно зависит от цветового спектра СИД, установленных в системе, следует руководствоваться общим правилом – чем больше число СИД (особенно разного цвета), тем выше коэффициент цветопередачи.

В системе цветного освещения разработчики должны учитывать точность цвета, разрешение цвета и спектр смешанных цветов. Один из важных факторов – разрешение пределов регулировки яркости. Расширение спектра смешанных цветов зависит от цветовой гаммы, обеспечиваемой светодиодами в системе, что напрямую определяется количеством СИД различных цветов, составляющих цветовую гамму. Количество СИД и разрешение регулировки яркости также влияет на цветовое разрешение.

Большинство систем цветного освещения имеет минимум три СИД обычно основных цветов: красного, зеленого и синего. Если с помощью интеллектуальной системы требуется получить какие-либо специфические цвета, разработчики могут определить, способны ли выбранные светодиоды обеспечить этот цвет с помощью цветовой шкалы CIE, соединяя точки цветовой гаммы. Если цветовая гамма не включает цвет, который нужно получить, разработчик может добавить новый цвет светодиода, который расширяет цветовую гамму.

Проблемой является обеспечение требуемого числа каналов регулировки яркости с достаточным разрешением. В системах с четырьмя и более СИД, кроме того, нужен более сложный алгоритм регулировки цветовой температуры, смешения цветов или увеличения коэффициента цветопередачи.

Разумеется, для интеллектуальных систем освещения нужно предусмотреть возможность управления количеством рассеиваемого тепла и обеспечить сортировку СИД по различными параметрам. При увеличении температуры светодиода светосила определенных СИД падает (например, для красного светодиода это очень заметно), и немного смещается длина волны света на выходе.

Использование радиаторов для рассеивания тепла и активное охлаждение являются необходимыми мерами. Однако эти методы не всегда предсказуемы и поддаются измерениям. Некоторое количество тепла всегда существует в системе, и точность передачи цвета из-за этого будет меняться.

Одним из входных данных для алгоритма расчета величины изменения яркости света является световой поток. Используя кусочно-линейную аппроксимацию кривой зависимости температуры от светового потока СИД, контроллер смешанного сигнала может управлять точностью передачи цвета посредством соответствующей регулировки светосилы СИД в системе. Сортировка по параметрам цветового оттенка необходима, т.к. СИД высокой яркости – это твердотельные приборы, и современный процесс их производства вносит разброс параметров, в частности, светосилы, длины волны и прямого напряжения. Из-за того, что световой поток является важной характеристикой при формировании смешанных цветов, отклонения этого параметра могут значительно влиять на результат. Однако в системах с низким качеством передачи цвета это может не приниматься во внимание.

Разработчики, которым важно качество передачи цвета, могут либо приобрести СИД со специальным бин-кодом, которые стоят на 15–20% дороже обычных, либо компенсировать отклонения параметров путем программирования контроллера смешанного сигнала. Можно составить таблицу бин-кодов, в которую вносятся возможные характеристики яркости

светодиодов в системе. Затем в процессе производства, когда получены реальные СИД, программу контроллера смешанного сигнала можно обновить в соответствии с полученными бин-кодами [8].

Перспективы использования органических светодиодов в системах освещения

В мировой тенденции развития SSL-устройств органические и неорганические светодиоды рассматриваются не как конкурирующие, а взаимно дополняющие технологии. При получении OLED-структур белого цвета свечения используется люминесценция нескольких органических материалов, что при смешивании дает белый цвет различных оттенков.

В настоящий момент производство OLED-устройств развивается с использованием двух основных процессов группового исполнения: ленточного (Web processing) и листового (Sheet processing). К *первому типу* относятся системы Roll-to-Roll, которые подразумевают производство устройств на длинной ленте-носителе с разделением устройств по ее длине. В системах с использованием *второго метода* групповое исполнение устройств осуществляется на подложках больших размеров с разделением устройств по длине и ширине подложки.

Для создания LED-светильника с распределенным диффузным светом необходимо применять различного рода рассеивающие конструкции (рис. 3а), в которых потери достигают 30–40%. В свою очередь, OLED-панель уже является распределенным источником света (рис. 3б).

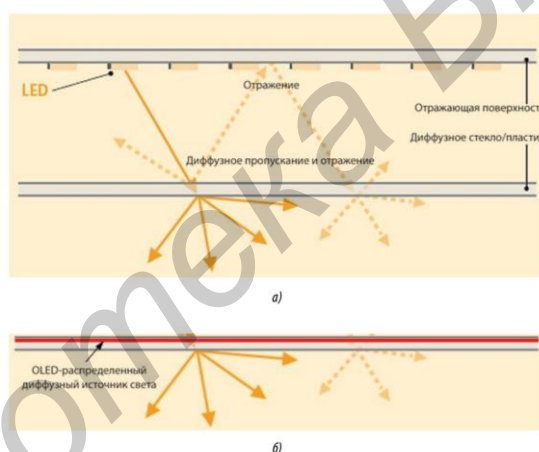


Рис. 3. Рассеивающая конструкция диффузного LED-светильника (а) и OLED-панель как распределенный диффузный источник света (б) [9]

Таким образом, LED-светильники выигрывают в секторе направленных источников света, а OLED – в секторе распределенных. Распределенный характер OLED-структур играет важную роль в процессе отвода тепла от активной области, которое неизбежно выделяется из-за потерь в структуре. В неорганических светодиодах рабочие плотности тока достигают значений в десятки A/cm^2 , что при высоком тепловом сопротивлении кристалл/корпус и отсутствии внешнего теплоотвода от корпуса светодиода приведет к его перегреву, выходу из строя или существенному снижению времени жизни и эффективности.

В OLED-структурах токи распределены по большой поверхности, и рабочая плотность тока составляет величину в десятки mA/cm^2 , что не приводит к существенному разогреву структуры и необходимости установки радиатора.

Единственным сертифицированным доступным в продаже продуктом является линейка OLED-панелей различных цветов и оттенков от Philips с эффективностью в 20 лм/Вт, яркостью 1000 кд/м^2 и временем жизни около 10 тыс. ч. Тем не менее, лабораторные образцы OLED-структур показывают весьма приличные характеристики, уже сравнимые с уровнем LED-технологии 2005–2006 гг. Компания Eastman Kodak продемонстрировала образцы белых OLED-светодиодов с эффективностью 62 лм/Вт при напряжении питания 3 В и плотности тока 5 mA/cm^2 .

Основными целями программ развития OLED-технологии США, Евросоюза и России является повышение эффективности устройств при снижении себестоимости. В программе DOE SSL Manufacturing Roadmap предусмотрены планы по снижению себестоимости OLED-устройств, произведенных по методам Sheet Processing и Web Processing (см. рисунок 6). Для снижения себестоимости единицы площади OLED-панели потребуется снижение стоимости исходных материалов и затрат на производство, что может обеспечить только серийное производство.

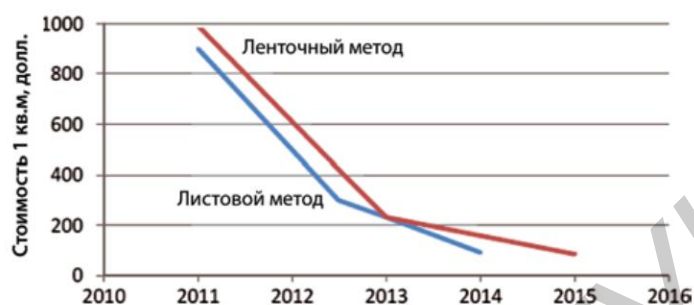


Рис. 6. Тенденции снижения себестоимости OLED-панелей[9]

Снижение стоимости килолюмена света OLED-панели должно быть обеспечено как снижением стоимости единицы площади панели, так и увеличением ее светимости (лм/м^2). Конечно, для коммерческого применения OLED-панелей необходима высокая эффективность панели не менее 100 лм/Вт и ресурс не менее 50 тыс. ч при спаде светимости на 30%. При успешном завершении европейского проекта OLED100.EU и выполнении планов US DOE можно уже в 2015 г. ожидать появления на рынке конкурентоспособных светотехнических устройств на основе OLED-панелей[9].

Заключение

Для многих разработчиков, переходящих от традиционных систем освещения к твердотельным, выбор используемых в проекте компонентов является довольно серьезной задачей. Однако уже сейчас существуют необходимая элементная база и средства программного обеспечения, использующие традиционные языки программирования, позволяющие разработчику проектировать интеллектуальных системы освещения на основе светодиодов высокой яркости.

Во многих случаях важнейшее значение имеют мощные программируемые средства управления и опыт разработчика по их использованию. Такие преимущества систем освещения на основе LED-источников белого света, как интеллектуальность, гибкость и экологичность, сопровождаются серьезными ценовыми проблемами и возможными компромиссами.

Учитывая научные и технологические достижения, разработку программ развития, принятых на уровне ведущих государств и крупнейших корпораций, не возникает сомнений в будущем успехе OLED-источников света, имеющих значительный потенциал снижения себестоимости и дополняющих кристаллические LED-источники в системах светодиодного освещения.

Литература

1. Буробин В., Коновалов А., Матвеев Ю. Решение проблем энергосбережения / Электроника: наука, технология, бизнес 3/2009 стр.48–51.
2. Mills P., Tomkins S., Schlangen L. The effect of high correlated colour temperature office lighting on employee wellbeing and work performance. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1186/1740-3391-5-2>. – Дата доступа: 5.11.2014.
3. Takatsugu Deguchi, Masahiko Sato. The Effect of Color Temperature of Lighting Sources on Mental Activity Level Ann. Physiol. Anthropol.11(1): 37-43.1992.

4. *Phipps-Nelson J., Redman J., Dijk D. Raiaratnam Stvl.* Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomo vigilance performance. *Sleep*, 2003 Sep;26(6):695-700.
5. *Revell V., Arendt J., Fogg L., Skene D.* Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neurosci Lett*, 2006 May 15; 399(1-2):96-100.
6. *Шуберт Ф.* Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. - М.: Физматлит, 2008. - 496 с.
7. *Пескин А.* // Полупроводниковая Светотехника №2, 2011, стр.60–63
8. *Tran S, Kropf B.* Understand LED-based white and color-mixing system design. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272460. – Дата доступа 4.11.2014.
9. *Стахарный С.* // Современная светотехника, №3/ 2010 стр.23 – 30.

PROBLEMS, COMPROMISE AND TRENDS IN LED LIGHTING DESIGN

A.P. Dostanko, A.V. Belyaev, V.P. Vasilevich, E.D., Vorotnitsky,
V.S. Gritskevich, O.N. Dubina, A.V. Chumakov

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics

Abstract

There were carried out analysis of the main aspects of obtaining high-precision lighting based on LEDs, considered compromises choosing a LED light sources for physiological, energy, color and cost characteristics, modern architecture and integration of software-controlled systems of intelligent LED lighting, the direction and development trend of lighting OLED.