

Динамически управляемая система освещения светодиодами с широким диапазоном цветовых температур (2800–10000 K) и высоким качеством цветопередачи ($R_a > 90$)

А. В. АЛАДОВ¹, С. Б. БИРЮЧИНСКИЙ², В. П. ВАЛЮХОВ³, А. Л. ЗАКГЕЙМ¹,
Н. А. ТАЛЬНИШНИХ¹, А. Е. ЧЕРНЯКОВ¹

¹ Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург

² ООО «Оптико-механические системы», Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого, Санкт-Петербург

E-mail: zakgeim@mail.ioffe.ru

Аннотация

Рассматриваются основные теоретические, конструкторско-технологические, схематехнические и программные аспекты создания динамически управляемой системы высококачественного освещения светодиодами с широким диапазоном коррелированных цветовых температур $T_{ки}$, 2800–10000 K. Для обеспечения высокого качества цветопередачи основу светильника со светодиодами составляет набор пятицветных (красный, синий, зелёный, тёпло-белый, холодно-белый) светодиодных матриц. Тёпло-белый и холодно-белый цвета создаются люминофорными светодиодами, дающими основной световой поток, а три остальных цвета — монохроматическими светодиодами, обеспечивающими плавную широкую регулировку $T_{ки}$ и поддержание высоких значений всех частных индексов цветопередачи, R_1 – R_{14} . Питание светодиодных матриц осуществляется в режиме широтно-импульсной модуляции с выбором оптимального амплитудного тока для каждого типа светодиодов, а получение требуемого светового потока достигается модуляцией длительности импульсов питающего тока. Предусмотрен дежурный (спящий) режим с минимальным энергопотреблением. Оптическая система светильника обеспечивает однородное цветосмещение и формирует оптимальное по условиям освещения пространственное светораспределение. Программное обеспечение, пульт дистанционного управления и система дистанционного управления по радиоканалу

позволяют управлять до 30 светильниками в радиусе до 35 м, задавая любые временные алгоритмы по световому потоку и $T_{ки}$.

Разработанная динамически управляемая система освещения светодиодами предназначена для общего освещения крупных промышленных (цеха, депо, операционные залы) и автономных объектов, с созданием оптимальной для работы персонала световой среды, а также для медицинского (в хирургии и диагностике), музейного и архитектурно-декоративного освещения.

Ключевые слова: светодиод, система освещения светодиодами, цветосмещение, индекс цветопередачи, коррелированная цветовая температура, динамически управляемый светильник, дистанционное управление, беспроводные сети.

1. Введение

Одной из наиболее заметных тенденций в освещении светодиодами (СД) в последние годы стало смещение интереса от чисто количественных показателей (световая отдача, световые потоки) к качеству генерируемого света. Действительно, успехи, достигнутые в повышении КПД СД на основе квантово-размерных *AllnGaN* гетероструктур, впечатляют: рекордные значения КПД синих СД (основа для люминофорных белых СД) достигли 84 %, причём, что важно для реальной эксплуатации, КПД остаётся высоким в широком диапазоне плотностей тока и температур [1]. Для белых СД (лабораторные образцы) фирмой *Cree Inc.* про-

демонстрирована световая отдача $\eta_v = 303$ лм/Вт [2], что близко к теоретическому пределу, а уровень η_v серийных СД приблизился к 200 лм/Вт [3, 4]. Достигнутые значения свидетельствуют о высокой степени совершенства как конструкции, так и технологии изготовления белых СД на основе синих *AllnGaN* кристаллов с люминофорным преобразованием излучения. (В качестве исторической справки отметим, что десять лет назад оптимистические прогнозы по η_v СД составляли 80–100 лм/Вт). В новой ситуации, когда мировые лидеры *Nichia*, *Cree*, *Philips Lumileds* и *Osram* вышли на примерно равный и очень высокий уровень η_v , существенную роль в конкурентной борьбе приобретают качественные показатели генерируемого света. Коль речь идёт об освещении, то это, в первую очередь, возможность реализации широкого диапазона $T_{ки}$, 2800–6500 K при одновременно высоком качестве цветопередачи [5]. По современным требованиям, для высококлассного освещения общий индекс цветопередачи R_a должен быть не менее 95, а индексы цветопередачи для насыщенных цветов R_8 – R_{14} — по крайней мере не ниже 85 [6].

Наконец, новое и, вероятно, важнейшее качество освещения СД — управляемость в процессе работы по спектру (цвету) излучения. Последнее, обозначаемое часто как «интеллектуальный», или «настраиваемый», или «персонализируемый» свет, реализуется в светильниках с СД (ССД) на основе полихромных матриц, работающих на принципе цветосмещения (*RGB*). Управляемость по спектру (или цвету) кардинально расширяет функциональные возможности ССД, меняя подходы к решению множества светотехнических задач, включая наиболее масштабную — искусственное освещение. Степень управляемости может быть разной: от варьирования во времени в определённом диапазоне $T_{ки}$ (для белого света) до воспроизведения широкой цветовой гаммы с миллионом цветовых оттенков [7, 8].

Для сохранения конкурентоспособности на современном быстро прогрессирующем рынке освещения СД необходимы комплексное совершенствование ССД и переход от единичных ССД к системам освещения СД, совмещающим высокую энергоэффективность генерации и качество

света с удобством и простотой эксплуатации, дистанционным управлением, надёжностью и длительным ресурсом. Указанная задача создания эффективных интеллектуальных систем освещения СД содержит как минимум следующие подзадачи:

- моделирование и экспериментальное исследование процессов цветосмещения, обоснование оптимального выбора исходных СД по спектрам излучения для получения белого света с заданными $T_{ки}$, световой эффективностью излучения, индексами цветопередачи или цветного света, определяемого конкретными применениями;

- разработка технологии и конструкции полихромных многокристальных СД модулей, вторичной оптики, средств электрической коммутации, теплоотвода и др.;

- разработка электронных блоков дежурного и рабочего питания, блоков задания режимов по цвету и интенсивности излучения в соответствии с заданными алгоритмами с использованием широтно-импульсной модуляции (ШИМ), устройств управления (УУ), непосредственно обеспечивающих питание СД матриц, а также элементов беспроводной сети: приёмно-передающих модулей дистанционного управления по радиоканалу от пульта или персонального компьютера (ПК);

- разработка программного обеспечения (ПО), обеспечивающего выбор, установку и регулировку режимов освещения, работу беспроводной сети.

Ниже рассматриваются пути решения данных подзадач на примере разработки динамически управляемой системы освещения СД (ДУСОСД), выполненной НТЦ микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН в рамках серии госконтрактов с Минобрнауки РФ.

2. Основные технические характеристики ДУСОСД

Как уже отмечалось, ДУСОСД должна, в первую очередь, обеспечивать регулируемую световую среду, оптимальную для жизнедеятельности человека в жилых и производственных помещениях, в том числе:

- имитировать освещение безоконных помещений с плавным изменением $T_{ки}$, отвечающим естест-

венному дневному циклу, задающему биологические циркадные ритмы;

- создавать специальные условия освещения для персонала, работающего при больших психофизических нагрузках (авиадиспетчеры, операторы центров управления, экипажи автономных объектов), способствующие либо повышению работоспособности и концентрации внимания, либо быстрой релаксации и снятию нервного напряжения во время перерывов в работе.

К другим применениям ДУСОСД можно отнести настраиваемое высококачественное музейное освещение и специальное медицинское освещение (для диагностики, контрастного выявления поражённых и здоровых участков тканей и др.).

В указанных целях ДУСОСД, содержащая до 30 отдельных ССД, даёт белое излучение с заданными цветовыми и световыми характеристиками, которые могут меняться во времени по заданной программе. При этом обеспечивается широкий диапазон $T_{ки}$, 2800–10000 К, с дискретностью выбора не более 200 К. Общий индекс цветопередачи R_a поддерживается на уровне не ниже 85, а индексы цветопередачи R_1 – R_{14} равны не менее 70 во всём диапазоне $T_{ки}$. Номинальный световой поток ССД составляет не менее 3000 лм, с возможностью его понижения с шагом в 10 % от номинального значения, а угол излучения («по уровню 0,5») – не менее 120°.

Управление световыми и цветовыми параметрами осуществляется дистанционно по радиоканалу с пульта дистанционного управления (ПДУ) или ПК. При этом обеспечиваются три режима работы:

- «Выключено» – сеть 220 В отключена;

- «Дежурный режим (спящий)» – питание (220 В) включено, свет выключен;

- «Рабочий режим» – работа в режиме обеспечения заданных требований к цветовым (колориметрическим) и световым (фотометрическим) характеристикам.

Мощность потребления отдельного ССД от источника питания в рабочем режиме не превышает 40 Вт, что позволяет не предусматривать наличия корректора коэффициента мощности. В дежурном режиме мощность рассеяния не превышает 0,5 Вт

ПДУ ДУСОСД обеспечивает: хранение во внутренней памяти режимов работы ДУСОСД; выбор программы и времени работы пользователем, с помощью кнопок ПДУ; управление работой ДУСОСД; синхронизацию работы нескольких ДУСОСД; привязку режима работы к реальному времени (времени суток); управление ДУСОСД (плавное изменение спектра излучения в течение суток с возможностью последующего повторения цикла) по радиоканалу на расстояниях до 35 м. Разветвлённая сеть ДУСОСД относится к устройствам локальных радиосетей (устройства малого радиуса действия, используемые для замены физических кабелей в локальных сетях передачи данных в пределах здания (помещения)).

СД модуль ССД содержит полихромные СД матрицы, оптическую систему формирования светового пучка и электронные блоки: источник питания, микроконтроллер со схемой управления и УУ СД матриц с ШИМ-регулированием светового потока по программе микроконтроллера. Диапазон регулирования скважности ШИМ – от 0 до 100 % с шагом в 0,1 %. Микроконтроллер обеспечивает приём команд управления с ПДУ или ПК, управление световыми характеристиками, регулировку температуры платы СД (более подробное рассмотрение отдельных блоков см. ниже). Общий вид отдельного ССД ДУСОСД с ПДУ приведён на рис. 1.

3. Полихромные светодиодные матрицы: оптимизация цветосмещения для получения белого света высокого качества

Вопросы оптимизации цветосмещения для получения белого света с заданной $T_{ки}$ и оптимальным ком-



Рис. 1. Общий вид полихромного управляемого светильника динамически управляемой системы освещения светодиодами (ДУСОСД) с пультом управления

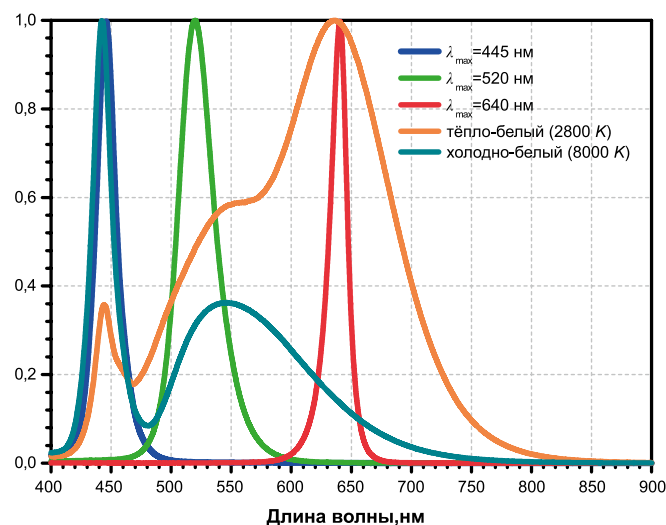
промиссом в соотношении «световая отдача – качество цветопередачи» применительно к СД в последние 10–15 лет исследованы достаточно полно и теоретически и экспериментально [9–12]. Обобщение ранее полученных результатов вкратце таково: при типичной полуширине спектров монохроматических СД $\Delta\lambda_{0,5} \approx 15\text{--}40$ нм получение белого света с $R_a \approx 90$ требует сложения излучений 4–5-ти таких СД с пиковыми длинами волн λ_{max} , относительно равномерно распределёнными в видимом диапазоне. Дальнейшее увеличение числа СД, мало что добавляет к значению R_a , но ведёт к заметным потерям η_v и усложнению системы. В то же время даже небольшое отклонение λ_{max} отдельных СД от оптимальных значений может приводить к резкому падению отдельных индексов цветопередачи, особенно $R_8\text{--}R_{14}$, относящихся к насыщенным цветам. Использование для цветосмешения люминофорных СД с более широким спектром, $\Delta\lambda_{0,5} \approx 70\text{--}100$ нм, естественно, облегчает проблему.

Для решения задачи смешения спектров монохроматических и люминофорных СД нами использовалась разработанная ООО «СОФТИМПАКТ» численная модель, позволяющая варьированием большого числа параметров смешения находить оптимум при специально заданной целевой функции [12]. В результате варьирования находится полный спектр излучения комбинированного ИС и проводится его анализ: определение координат цветности x и y , $T_{кц}$, R_a , $R_1\text{--}R_{14}$ и световой эффективности излучения. Модель позволяет формировать многопараметрическую целевую функцию и проводить оптимизацию белого света с заданной $T_{кц}$ либо по R_a , либо по световой эффективности излучения.

По результатам компьютерного моделирования нами для экспериментальных исследований по синтезу высококачественного белого света с $T_{кц} = 2800\text{--}10000$ К были выбраны пять СД для СД матрицы. Три монохроматических СД, два на основе *AllnGaN* (460/22 нм, 520/34 нм) и один на основе *AlGaInP* (630/15 нм)¹, и два люминофорных СД, тепло- и холод-

¹ Здесь через дробную черту указаны экспериментальные значения λ_{max} и $\Delta\lambda_{0,5}$.

Рис. 2. Относительные спектры излучения 3-х монохроматических и 2-х люминофорных светодиодов, используемых в качестве основы для цветосмешения



но-белого света с $T_{кц}$, соответственно, 2800 и 8000 К. Относительные спектры излучения выбранных исходных СД приведены на рис. 2.

В экспериментах по «синтезу» заданных $T_{кц}$ вначале задавались потоки излучения СД, полученные по результатам моделирования (оптимизация по максимуму R_a), а потом при непосредственном визуальном контроле за колориметрическими характеристиками с помощью прибора «OL 770-LED High-speed LED Test and Measurement System» проводилась соответствующая индивидуальная подгонка потока излучения каждого СД (посредством ШИМ).

Экспериментальные исследования совместно с моделированием показали, что выбранные базовые СД позволяют осуществить синтез высококачественного белого света в широком диапазоне $T_{кц}$: 2800–10000 К. На рис. 3 показаны соответствующие относительные спектры излучения, R_a , и $R_1\text{--}R_{14}$. Отметим, что при всех $T_{кц}$ основной вклад в общий световой поток вносят люминофорные СД, монохроматические же СД играют корректирующую роль, по «вытягиванию» $R_1\text{--}R_{14}$. При этом видно, что в части тепло- и нейтрально-белого света ($T_{кц} = 2800\text{--}5000$ К) реализуется ситуация, при которой $R_a \geq 90$, а все частные индексы, $R_1\text{--}R_{14}$, ≥ 80 , причём R_1 , R_5 и R_{13} приближаются к 100. Особенно важно высокое значение R_9 и R_{13} : до 95–98; эти индексы не учитываются в расчёте R_a , но важны для правильной цветопередачи биологических тканей и кожи. Лишь для очень холодных оттенков белого ($T_{кц} = 6500\text{--}10000$ К), редко используемых в освещении,

наблюдается снижение R_a до 85–87, а R_{10} и R_{12} до 60–65.

4. Конструктивно-технологические решения и оптическая схема светильников на основе полихромных СД модулей для ДУСОСД

Как уже отмечалось, разработанная ДУСОСД может объединять под общим управлением до 30 ССД. При этом основные задачи создания отдельного ССД сводятся к:

- выбору СД элементной базы, конструированию многоэлементного модуля с заданным расположением СД, индивидуальной электрической коммутацией и эффективным теплоотводом;
- разработке оптической системы, обеспечивающей высокий коэффициент передачи, заданное светораспределение и равномерность распределения цветовых параметров по площади выходного отверстия ССД и в дальней зоне;
- разработке схемы управления и электронных блоков, включающих источники питания, микропроцессор, УУ, датчики обратной связи, радиоканал передачи данных управления, ПДУ или ПК, ПО.

Общая структура ССД показана на рис. 4. Ключевой элемент ССД – полихромный СД модуль (плата с СД и вторичной оптикой). Спектральные характеристики СД, входящих в него, приведены выше, и требовалось выбрать соответствующие им СД, с возможно большими η_v и световым потоком. Современная промышленность (зарубежная) предлагает широкую

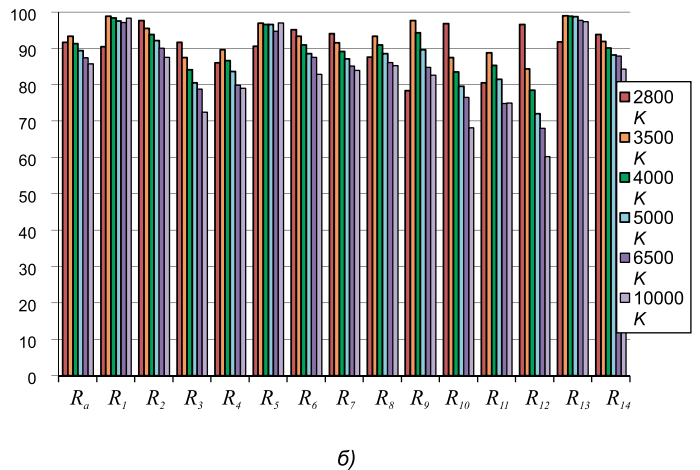
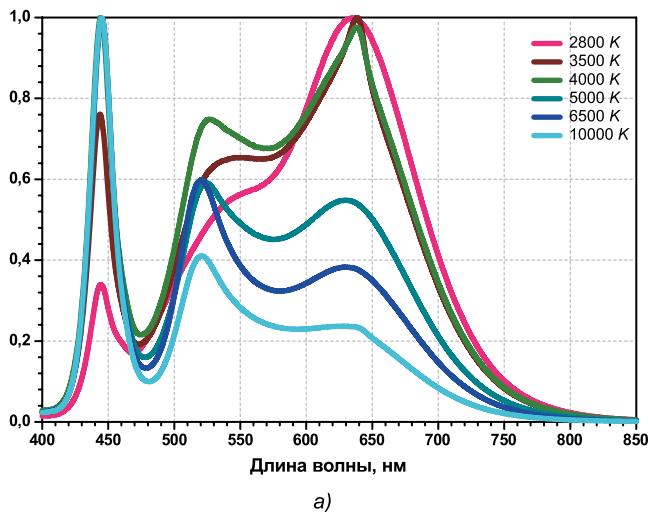


Рис. 3. Относительные спектры излучения (а) и индексы цветопередачи R_a, R_1-R_{14} (б) светильников со светодиодами с коррелированной цветовой температурой $T_{кл}$ 2800, 3500, 4000, 5000, 6500 и 10000 К

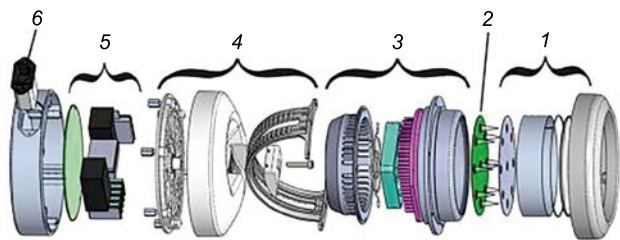


Рис. 4. Схематический вид основных узлов светильника со светодиодами:
1 – оптическая система, 2 – светодиодный модуль, 3 – радиатор с вентилятором, 4 – основание корпуса с поворотным механизмом, 5 – электронный блок питания и управления, 6 – световой фильтр

номенклатуру трёх-четырёхцветных и белых мощных СД в качестве элементной базы для полихромных ССД.

По совокупности качеств (функциональных, конструктивных, ресурсных) нами были выбраны 4-кристальные СД фирмы *Osram Opto Semiconductors* «LE RTDUW S2W» типа $R-G-B-W_{(cold)}$ и «LE CWUW S2W» типа $W_{(cold)}-W_{(warm)}$ [13]. В состав ССД вошли девять таких СД, четыре из которых типа $R-G-B-W_{(cold)}$ и пять – $W_{(cold)}-W_{(warm)}$. Это обеспечило наилучшее сочетание предельных световых потоков при варьировании цветовых характеристик. СД крепились на Al радиаторе, снабжённом вентилятором. В ходе исследований температура активной области СД контролировалось с помощью приборов «T3Ster» и «Ledmeter» по температурозависимым характеристикам (прямое напряжение), а общее температурное поле платы СД модуля контролировалось с помощью ИК тепловизора

Для поддержания теплового режима плата излучателей снабжена датчиком температуры, задающим включение вентилятора.

Оптическая система ИС должна обеспечивать высокий коэффициент передачи излучения от СД к выходному окну, заданное пространственное светораспределение, а также однородность по цвету в дальнем и ближнем поле, то есть хорошее смешение излучений отдельных СД. Расчёты и оптимизация оптической схемы проводились в соответствии с теорией по архитектуре оптимальных оптических систем. Была предложена специальная оптика для максимального обеспечения вышеприведённых требований.

Первым, достаточно очевидным, решением является добавление бокового отражателя на внутренней поверхности корпуса ССД между платой СД и выходным окном, который, как показывает расчёт, на 20 % повыша-

ет выходной световой поток. Далее были проанализированы различные геометрии вторичной линзы для выбранных СД для получения оптимального соотношения светового потока и пространственно-цветовых характеристик. В конце концов был выбран конический оптический элемент (сравнительно простой в изготовлении), рассчитаны соотношения высоты конуса к диаметру его основания, отвечающие компромиссу между коэффициентом вывода излучения, качеством цветосмещения и равномерностью (без провалов) пространственного светораспределения.

Выигрыш по эффективности светопередачи от использования конического оптического элемента и бокового отражателя позволяет дополнить оптическую схему рассеивателем с малыми оптическими потерями и определённым (расчётным) профилем, который существенно улучшает равномерность свето- и цветораспределения. Ещё один введённый оптический элемент для увеличения светопередачи – тыльный диффузный отражатель, перекрывающий все участки платы между СД. Указанная светооптическая система (рис. 4, поз. 1) оптимально решает задачи равномерного и широкого поверхностного и пространственного распределения (и гомогенизации) цветовых характеристик. Как видно из рис. 5, пространственное светораспределение осесимметрично и угол излучения составляет около 125° . Собственно СД модуль расположен на поворотном устройстве, крепящемся

к основанию корпуса ССД (рис. 4), а электронный блок содержит источники рабочего и дежурного питания, приёмо-передающие модули обмена информацией с ПДУ по беспроводному каналу связи, схемы микроконтроллера и УУ, задающих режимы работы СД и, соответственно, выходные характеристики ССД. Входной сетевой фильтр размещён непосредственно на входе преобразователей. Более подробно принципы функционирования и состав электронных блоков рассмотрены ниже.

5. Функциональная электрическая схема и её особенности

В основании корпуса 1 функциональной электрической схемы ССД (рис. 6) размещены входной сетевой фильтр СФ 2, параллельно подключённые к СФ два преобразователя 3 переменного тока в постоянный, образующие основной блок питания (БП) в виде двух составных частей БП-1 и БП-2. СД модуль образуют пять цветных групп (линеек последовательно включённых СД) *R*, *G*, *B*, *W_(cold)* и *W_(warm)*, 4–8 соответственно, размещённых на основании 9 и подключённых к пяти блокам УУ (ДР1–ДР5) 10, управляющих световым потоком каждой группы СД. Там же на плате располагается микроконтроллер МК 11 и блок источника питания режима ожидания (ИПРО) 12.

Выход БП-1 3 подключён к первым входам двух блоков 10 (ДР1 и ДР2), а выход БП-2 3 соединён с первыми входами трёх других блоков 10 (ДР3–ДР5). Вторые входы блоков 10 (ДР1–ДР5) соединены, соответственно, с первым–пятым выходами МК 11. Управление параметрами излучения ССД может осуществляться по сигналам, подаваемым на вход МК 11 с ПК 13 или по радиоканалу с ПДУ. ССД содержит размещённый на основании 9 датчик температуры ДТ 14 и установленный под основанием 9 вентильют В 15. ДТ 14 в этом случае соединяют с входом МК 11, выход которого подключают к В 15.

Оригинальным решением является включение в схему двух преобразователей переменного тока в постоянный, имеющих одинаковую номинальную мощность P_{np} и образующих каналы, работающие независимо друг от друга. Статистиче-

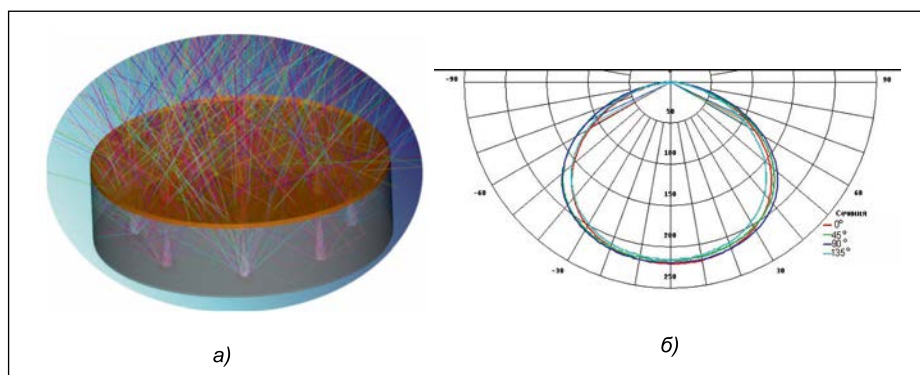


Рис. 5. Моделирование оптической системы по методу трассировки лучей (а) и график пространственного распределения излучения (б).

ская независимость этих преобразователей переменного тока в постоянный обуславливает некоррелированность электромагнитных наводок и помех, а также внутренних шумов, суммарные уровни которых оказываются ниже, чем у электромагнитных наводок, помех и внутренних шумов одного преобразователя переменного тока в постоянный, имеющего номинальную мощность $2P_{np}$.

Кроме того, применение в осветительном устройстве вместо одного преобразователя переменного тока в постоянный двух параллельных преобразователей половинной мощности, позволяет на практике существенно уменьшить занимаемые ими площадь и объём в ССД. Вследствие этого уменьшения появляется возможность размещения входного сетевого фильтра непосредственно на входе преобразователей, что также благоприятно отражается на уровне промышленных помех, создаваемых осветительным устройством, за счёт уменьшения длины соединительных проводов между входным сетевым фильтром и преобразователями.

Преобразование постоянного напряжения от источника напряжения в ток СД производится УУ с ШИМ-регулирующим светового потока по программе микроконтроллера. Ди-

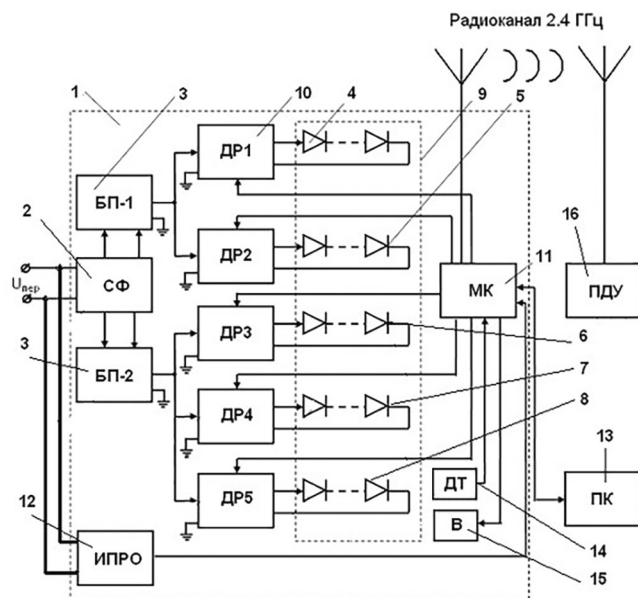


Рис. 6. Функциональная электрическая схема светильника динамически управляемой системы освещения светодиодами (ДУСОСД)

азон регулирования скважности ШИМ – от 0 до 100 %, с шагом 0,1 %. Микроконтроллер обеспечивает приём команд управления с ПДУ или ПК, управление световыми характеристиками и контроль за температурой платы СД. Мощность потребления одного ССД от источника питания не превышает 40 Вт в рабочем режиме. Это позволяет обходиться без введения в схему корректора коэффициента мощности. В дежурном режиме мощность рассеяния не превышает 0,5 Вт.

Для управления СД выбрано импульсное повышающее УУ «MAX16834», причём регулирование светового потока производится посредством ШИМ с током до 1500 мА.

Питание ПДУ осуществляется от сети с потребляемой мощностью в режиме «Программирование» не более 5 Вт, а в рабочем режиме – 0,5 Вт.

Так как управление сетью ДУСОСД с ПДУ связано с круглосуточным режимом работы, актуальным является уменьшение потребляемой мощности в дежурном режиме («*standby*»). Проблема решена разработкой блока питания для передатчика с микроконтроллером как для ПДУ, так и для ССД; последний в режиме приёма потребляет 60–80 мВт, а в дежурном – (1–5) мкВт.

6. Беспроводная сеть и её программное обеспечение

При создании сети ДУСОСД, которая формирует устройство «*LR-WPAN*» («*Low-Rate Wireless Personal Area Network*»), основная задача состоит в передаче сравнительно небольших объёмов данных на небольшие расстояния, причём сеть должна иметь минимальное потребление, реализуя необходимые схемы мониторинга и управления при решении светотехнических задач [14].

В описываемой системе освещения технология построения сети основана на стандарте *IEEE802.15.4* и его программной надстройке «*ZigBee*» [15, 16], которые описывают разные уровни классической схемы взаимодействия открытых систем.

Низкое отношение сигнал/шум позволяет сигналам стандарта успешно сосуществовать с альтернативными источниками излучения на той же частоте (*Wi-Fi*, *Bluetooth*). В стандарте также предусмотрены каналы, которые не пересекаются по частоте с конкурентами, что позволяет реализовывать сеть даже в непосредственной близости от очень мощных источников излучения.

Модель передачи данных определяется топологией сети, в нашем случае это «звезда» [2] (рис .7).

В любой сети должен иметься только один координатор сети, выполняющий функции её создания и организации обмена. В сети ДУСОСД реализуются три варианта компоновки (организации):

- Вариант 1 – с ПК в качестве координатора сети и ПДУ в качестве оконечного устройства. Данная сеть полезна для настройки, тестирования и загрузки в ПДУ программ управления.

- Вариант 2 – с ПК в качестве координатора сети и ССД в качестве оконечных устройств. Предназ-

начен для настройки, тестирования ДУСОСД и управления освещением, когда не требуется длительного (круглосуточного) цикла. Преимуществом этого варианта является простота изменения режимов работы, а к его недостаткам следует отнести повышенное энергопотребление, сложность создания

дежурного режима и сложность автоматической перезагрузки ПК в аварийных ситуациях (плюс повышенное время перезагрузки операционной системы и программы).

- Вариант 3 – с ПДУ в качестве координатора сети. Предназначен для управления освещением с коротким и длительным (круглосуточным) циклом. Данному варианту присущ более сложный ввод программы управления освещением, но к преимуществам относятся возможность работы в круглосуточном режиме, минимальное потребление энергии всей системой в ждущем режиме (когда выключено освещение) и предельная быстрота восстановления освещения в аварийных ситуациях.

ПДУ выполнен в виде блока, который вставляют в розетку сети электропитания, с цветным *TFT*-индикатором (размер по диагонали – 3,5 дюйма) и с клавиатурой, состоящей из шести кнопок. ПДУ обеспечивает дискретное задание устанавливаемых $T_{ки}$, яркости каждой линейки СД, а также режима или времени суток его изменения. Микроконтроллер содержит кварцевые часы.

ПДУ обеспечивает целый ряд функций: хранение во внутренней памяти режимов работы ССД; выбор программы и времени работы пользователем, с помощью кнопок ПДУ; управление работой ДУСОСД; синхронизация работы нескольких ДУСОСД; привязка режима работы к реальному времени (времени суток); управление ДУСОСД по радиоканалу (плавное изменение спектра излучения в течение суток с возможностью последующего повторения цикла).

ПДУ обеспечивает управление ССД на расстоянии до 35 м. Дальность передачи данных беспроводной

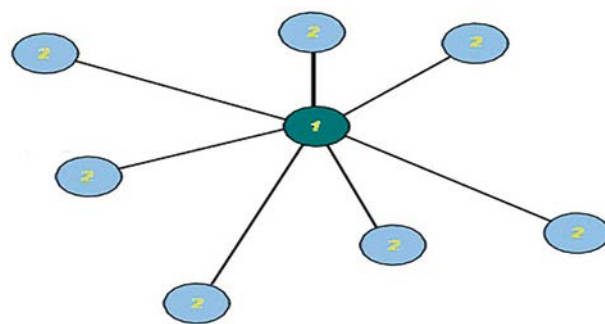


Рис. 7. Оптимальная конфигурация сети динамически управляемой системы освещения светодиодами (ДУСОСД) – «звезда»: 1 – координатор сети, 2 – оконечные устройства

сети определяется чувствительностью приёмника, мощностью передатчика и наличием помех (препятствия, в том числе стены, и другие источники радиосигнала). Скорость передачи данных – от 250 кбит/с до 2,0 Мбит/с, число каналов – 16, с шагом в 5 МГц.

ПО сети представлено набором программ и позволяет реализовывать следующие режимы работы:

- управление с ПДУ разветвлённой сетью ДУСОСД по радиоканалу в круглосуточном энергосберегающем режиме;

- программирование на стадиях изготовления ПДУ и ДУСОСД уникального заводского адреса для каждого ССД с целью его сопряжения с ПДУ в процессе эксплуатации, а также для помехоустойчивости и сетевой безопасности;

- тестирование ДУСОСД и настройка сети с ПК, при этом ПДУ заменяется ПК с *USB*-адаптером;

- программирование режимов работы и установка программы в ПДУ с подключением ПК через адаптер.

ПО предусматривает также возможности аварийного отключения при превышении температуры радиатора, заданной условиями эксплуатации, и регулирования скорости вращения вентилятора (в случае необходимости).

7. Заключение

В статье приведены результаты комплексной разработки ДУСОСД, включающей до 30 ССД, управляемых по радиоканалу с единого ПДУ или ПК. Рассмотрены конструктивно-технологические аспекты создания динамически управляемых ССД, а также схемотехнические решения электронных блоков управления и ПО.

Продемонстрирована возможность достижения высокого качества освещения с общим и частными индексами цветопередачи порядка 90 в широких диапазонах $T_{ки}$ (2800–10000 К) и уровней освещённости. Разработанная система освещения позволяет по заданным алгоритмам менять в течение суток $T_{ки}$ и освещённость, либо имитируя естественный свет, либо создавая специальные условия освещения, оптимальные для той и иной деятельности. ДУСОСД в основном предназначена для промышленных (цехов, депо, операционных залов), и автономных объектов, лишённых естественного света, но может быть использована и в жилых помещениях, обеспечивая индивидуально настраиваемый, благоприятный для пребывания, свет.

Авторы благодарят К.А. Булашевича и С.Ю. Карпова за моделирование и проведение расчётов по оптимизации цветосмещения.

Измерения световых параметров выполнены в ЦКП «Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники: технология, диагностика, метрология».

Исследования выполнены в рамках серии госконтрактов с Минобрнауки РФ, в том числе одного действующего (№ 14.607.21.0010 от 05.06.2014, уникальный идентификатор: RFMEFI60714X0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hurni Ch.A., David A., Krames M.R. et al. Bulk GaN flip-chip violet light-emitting diodes with optimized efficiency for high-power operation // Appl. Phys. Lett. – 2015. – Vol. 106, No. 3. – Article ID1101.
2. Cree: First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier. URL: <http://cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier> (дата обращения: 06.2016).
3. Cree's MK-R LED Offers up to 200 Lumens-Per-Watt. LED professional Review 35, 2013, 6.
4. URL: <http://www.ledsmagazine.com/content/leds/en/articles/2014/05/cree-launches-200-lm-w-1226-lm-discrete-led-for-directional-ssl.html?cmpid=EnLEDsMay282014> (дата обращения: 06.2016).
5. Specifications for the Chromaticity of Solid State Lighting Products / ANSI/NEMA C78.377–2008.
6. LED Engine Achieves Highest Color Rendering in World's Smallest LED Emitters for High-End Directional Lighting. LED Professional Review LpR37 | 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 (дата обращения: 06.2016).
7. Закгейм А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность зрительное восприятие, безопасность для здоровья человека // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12–20.
8. Аладов А.В., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н., Черняков А.Е. Полихромные спектрально-перестраиваемые осветительные приборы со светодиодами: опыт разработки и применения // Светотехника. – 2013. – № 5–6. – С. 34–40.
9. Zukauskas A., Vaicekauskas R., Ivanauskas F., Gaska R., Shur M.S. Optimization of white polychromatic semiconductor lamps // Appl. Phys. Lett. – 2002. – Vol. 80 – P. 234; Chhajed S., Xi Y., Li Y. – L., Gessmann Th., Schubert E.F. Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. 97, No. 5. – Article ID054506.
10. Ohno Y. Spectral design considerations for white LED color rendering // Optical Engineering. – 2005. – Vol. 44, No. 11. – Article ID11302.
11. Гутцайт Э.М., Закгейм А.Л., Коган Л.М., Маслов В.Э., Социн Н.П. К моделированию стандартных источников света светодиодными модулями // Светотехника. – 2013. – № 4. – С. 61–66.
12. Булашевич К.А., Кулик А.В., Карпов С.Ю., Черняков А.Е., Аладов А.В., Тальнишних Н.А., Закгейм А.Л. Оптимизация смещения цветов для перестраиваемых твердотельных источников света / Тез. докл. 10-й Всерос. конф. «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». – СПб., 2015. – С. 12.
13. URL: http://www.osram-os.com/osram_en/company/index.jsp (дата обращения: 06.2016).
14. Аладов А.В., Валюхов В.П., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Динамически управляемые светодиодные источники света для новых технологий освещения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. – 2014. – № 4 (206). – С. 38–40.
15. Беспроводные сети ZigBee и IEEE802.15.4. Yu. Semenov (ИТЕР-МИРТ).: URL: <http://book.itper.ru/4/41/zigbee.htm> (дата обращения: 06.2016).
16. Аладов А.В., Валюхов В.П., Демин С.В., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Беспроводные сети управляемых энергоэффективных светодиодных источников освещения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Физико-математические науки. – 2015. – № 1 (213). – С. 50–60.



Аладов Андрей Вальменович, физик. Окончил в 1981 г. физический факультет Белорусского государственного университета. Старший научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники

и субмикронных гетероструктур РАН



Валюхов Владимир Петрович, доктор техн. наук. Окончил в 1963 г. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. Профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета имени Петра Великого

и субмикронных гетероструктур РАН



Тальнишних Надежда Андреевна, инженер. Окончила в 2014 г. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Стажёр-исследователь Научно-технологического центра микроэлектроники

и субмикронных гетероструктур РАН



Бирючинский Сергей Борисович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 1996 г. Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет). Технический директор ООО «Оптико-механические системы»

и субмикронных гетероструктур РАН



Закгейм Александр Львович, кандидат техн. наук. Окончил в 1972 г. Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина). Учёный секретарь и зав. лабораторией Научно-технологического центра микроэлектроники

и субмикронных гетероструктур РАН



Черняков Антон Евгеньевич, кандидат физ.-мат. наук. Окончил в 2006 г. Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Научный сотрудник Научно-технологического центра микроэлектроники

и субмикронных гетероструктур РАН