

Актуальные вопросы, возникающие при разработке светодиодных светильников

Сергей Матвеев (Санкт-Петербург)

При разработке светодиодных приборов освещения инженеры сталкиваются с техническими проблемами, связанными с технологией изготовления элементной базы. Для решения некоторых задач бывает достаточно консультации специалиста. Руководитель отдела разработки компании IntiLED ответил на наиболее популярные вопросы.

Можно ли получить чистый белый цвет путём смешения цветов R+G+B применительно к светодиодному светильнику? Каким образом можно приблизить получаемый белый цвет к идеальному?

Теоретически это возможно, а вот на практике приходится сталкиваться с рядом ограничений, которые препятствуют получению идеального результата. Рассмотрим факторы, влияющие на чистоту белого цвета, получаемого путём смешения трёх RGB-компонентов применительно к светодиодному светильнику с вторичной оптикой, а также решения, позволяющие минимизировать влияние данных факторов.

Первое – это разброс параметров светодиодов по двум основным характеристикам: световому потоку и длине волны излучения. Даже при использовании светодиодов одной партии и одной группы всегда возможен разброс этих параметров. Таким образом, собранные светодиодные модули изначально немного отличаются друг от друга. Данная проблема решается путём калибровки смонтированных светодиодных модулей с подстройкой баланса белого и сохранением калибровочных коэффициентов в энерго-независимой памяти модуля либо све-

тильника, если проводится калибровка светильника целиком.

Второе – зависимость этих же параметров от температуры, причём различная для кристаллов разных цветов (см. рис. 1). Данная проблема решается путём использования программных средств и введения температурной коррекции.

Третье – изменение указанных параметров по мере старения светодиода. Также решается программными средствами на основе аппроксимации предоставляемых производителем сведений о динамике старения светодиодов.

Необходимо отметить, что первые три проблемы могут быть решены и другим способом – наличием в системе обратной связи от цветовых датчиков, но их применение не всегда возможно из-за конструктивных и функциональных особенностей светильника. Кроме того, применение данных механизмов требует возможности управлять каждым светодиодом в отдельности, что приводит к существенному усложнению схемы.

Четвёртое – зависимость геометрии выхода света после вторичной оптики от длины волны излучения. По этой причине при использовании одинаковых линз на светодиодах разного цвета мы получаем несовпадающее распределение света. На сегодняшний день при решении данной проблемы приходится либо мириться с тем, что производители вторичной оптики не делают различия при разработке линз для светодиодов с разной длиной волны, либо в некоторых случаях использовать рефлекторы вместо коллиматоров, поскольку проблема возникает в основном при использовании оптики с узкой диаграммой.

Пятое – существование допусков по точности изготовления оптической системы, а именно:

- расположение кристалла на подложке и размеры самого кристалла;
- позиционирование первичной оптики (силиконовой линзы) относительно кристалла;
- позиционирование корпуса светодиода на печатной плате;
- позиционирование вторичной оптики относительно светодиода.

Данную проблему можно частично решить лишь путём уменьшения допусков во всей технологической цепочке изготовления оптической системы.

Шестое – смешение цветов происходит от разнесённых в пространстве источников света, поэтому существует зона несмещения цвета вблизи источников, а также так называемые краевые эффекты – искажение цвета на крайних областях диаграммы распределения света.

Решением может стать применение дополнительных рассеивающих материалов: плёнок, матовых стёкол, вторичной оптики с рассеивающими элементами. Однако это снижает эффективность светильника и не всегда применимо для узких диаграмм.

Седьмое – неоднородное загрязнение поверхности выхода света светильника в процессе эксплуатации либо появление на поверхности капель воды, приводящее к нарушению баланса цветовых компонентов. Лучшие результаты в решении данной проблемы показывает применение полноцветных светодиодов с общей вторичной оптикой, поскольку из светильника выходит уже смешанный цвет и локальные загрязнения не искажают цвет, а лишь изменяют его интенсивность. Это решение хорошо зарекомендовало себя для оптики с относительно широкой (>20 град.) диаграммой. На более узких диаграммах общая картина хуже, чем при использовании отдельных линз для каждого светодиода. Кроме того, в данном случае имеет место влияние на температуру кристаллов их «соседей» по подложке, что усложняет решение проблем программной цветотемпературной коррекции.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что достижение

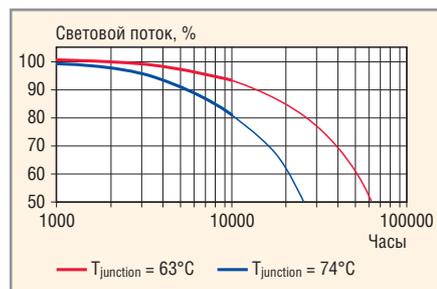


Рис. 1. График зависимости величины светового потока и срока службы от температуры кристалла (на примере температур 63 и 74°C) для светодиода белого цвета

чистого белого цвета путём смешения цветов R+G+B на практике реализовать трудно, однако никто не мешает производителям всеми возможными способами стремиться к идеальным показателям.

Влияет ли расположение светодиодов в RGB- и RGBW-осветительных приборах на чистоту цвета и количество краевых эффектов?

Безусловно, влияет. Для улучшения цветосмешения и уменьшения нежелательных световых эффектов необходимо размещать светодиоды таким образом, чтобы они представляли собой скомпенсированные группы. Примеры такого расположения светодиодов разных цветов показаны на рисунках 2 и 3. Это позволяет достигнуть оптимального смешения цвета и свести к минимуму нежелательные световые эффекты.

Как избежать образования наледи на стекле, когда светильник светит снизу вверх?

Наледь на стекле образуется при остывании светильника после отключения во время осадков. Вред от наледи очевиден – уменьшается яркость светильника, полностью изменяются кривые силы света (КСС), могут искажаться другие световые характеристики.

Для предотвращения образования наледи светильник не должен иметь бортов существенно выше поверхности стекла, чтобы исключить скопление воды. Желательно также избегать строго горизонтального расположения светильника. Данные меры позволяют уменьшить вероятность образования наледи, но не могут служить панацеей от этого неприятного явления.

В отличие от традиционных источников света, светодиодные светильники имеют низкую температуру поверхности выхода света и не в состоянии растопить образовавшуюся наледь при низкой температуре окружающей среды. В данном случае проблему можно полностью решить подогревом стекла светильника дополнительными нагревательными элементами.

Световой поток светодиода и световой поток светильника: в чём практическая разница между этими двумя понятиями? Какие факторы влияют на световой поток светодиодного модуля?

Для начала необходимо вспомнить следующие определения:

- световой поток – это количество световой энергии;
- световой поток светодиода – количество световой энергии, испускаемой светодиодом (см. рис. 4);
- световой поток светильника – количество световой энергии, испускаемой светильником.

Если о световом потоке светодиода обычно известно из документации производителя, то световой поток изделия можно узнать в документации производителя изделия либо по результатам испытаний третьей стороной, при этом чаще всего показатели будут различаться.

Можно ли теоретически получить точную величину светового потока светильника? Казалось бы, он должен быть равен сумме значений световых потоков светодиодов, используемых в изделии.

На практике это не так, хотя многие производители используют именно такие примитивные вычисления. Чаще всего при подобном «теоретическом» подсчёте используются величины светового потока светодиодов с наилучшими в своей серии показателями. Однако надо понимать, что не бывает одинаковых светодиодов: производители осуществляют их ранжирование в том числе и по световому потоку, и количество рангов может превышать три, а отличие между рангами – достигать 10%. В таком случае совершенно очевидно, что отличие величин светового потока светодиода между крайними рангами может превышать 20%. Но недобросовестный производитель, скорее всего, укажет световой поток изделия с учётом использования светодиодов с максимальным рангом.

Кроме того, при подобном «теоретическом» вычислении светового потока можно случайно или специально забыть о том, что данная величина понижается с ростом температуры кристалла, что неизбежно для мощных светодиодов. Большинство производителей светодиодов указывают номинальный световой поток, измеренный при температуре кристалла 25°C, но его рабочая температура около 80..90°C. Из-за тепловых потерь световой поток снижается на 10%.

Помимо тепловых потерь, необходимо учитывать оптические потери на переходе границ сред (такими границами могут быть вторичная оптика, защитное стекло или поликарбонат, «оп-

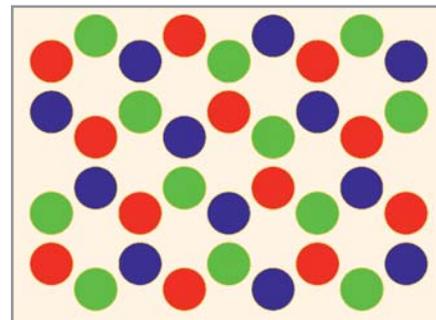


Рис. 2. Схема расположения RGB-светодиодов в прожекторе IntiSTARK

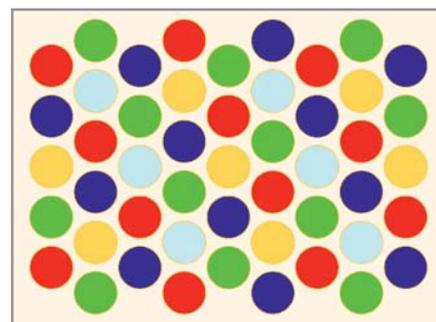


Рис. 3. Схема расположения RGBW-светодиодов с регулируемой цветовой температурой в прожекторе IntiSTARK

Установлены тёплые и холодные белые светодиоды

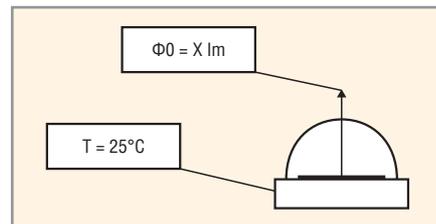


Рис. 4. Световой поток светодиода

тически-прозрачный» компаунд). В лучшем случае применение такого дополнительного оптического «барьера» поглощает около 10% суммарного светового потока.

Дополнительным фактором является время работы, приводящее как к деградации кристалла светодиода, так и к прозрачности оптических барьеров (см. рис. 5).

Единственно правильным решением для определения светового потока светильника будет испытание изделия в специализированной лаборатории и получение объективных результатов испытаний. В технических характеристиках светодиодных светильников необходимо указывать как световой поток светодиода, так и изделия целиком, с учётом факторов, снижающих световой поток светодиодного модуля, – потерь на вторичной оптике и защитных стёклах, а также внутренних переотражений.

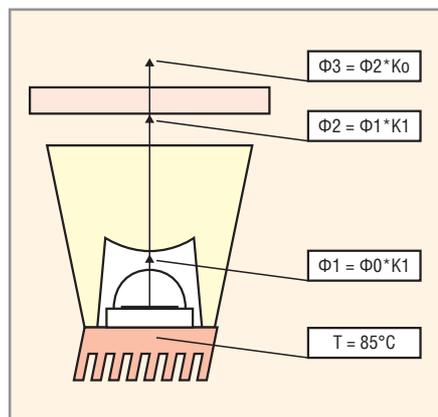


Рис. 5. Факторы, влияющие на снижение светового потока светодиода

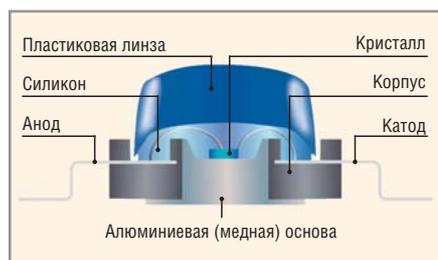


Рис. 6. Конструкция светодиода

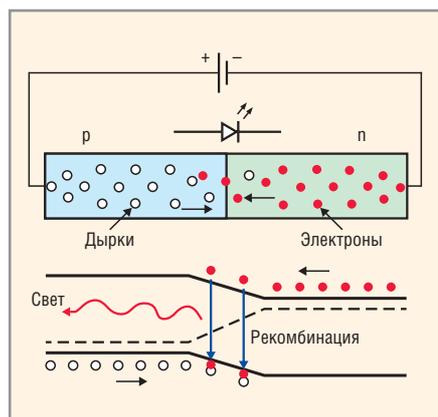


Рис. 7. Схема p-n-перехода

Существует ли взаимосвязь между цветом свечения светодиода и сроком его службы?

Да, взаимосвязь существует. Белые светодиоды имеют меньший срок службы. Основой светодиода белого цвета свечения является структура InGaN (синий цвет) и нанесённый сверху люминофор (специальный состав), излучающий в широком диапазоне спектра и имеющий максимум в его жёлтой части. Человеческий глаз комбинацию такого рода воспринимает как белый цвет. Это на данный момент наиболее простой и дешёвый способ получения белого света.

Однако люминофор ухудшает тепловые характеристики светодиода, поэтому срок службы сокращается. Дegradация люминофора приводит не

только к уменьшению яркости светодиода, но и к изменению оттенка его свечения. При сильной деградации люминофора хорошо заметен синий оттенок свечения. Это связано как с изменением свойств люминофора, так и с тем, что в спектре начинает доминировать собственное излучение кристалла.

Если же говорить о сроках службы светодиодов с различными типами подложек, то более стойкими к деградации параметров являются AlGaInP- и AeGaAs-светодиоды, т.е. красные и жёлтые; менее стойкими – InGaN, т.е. зелёные, синие и белые. Большинство InGaN/GaN-светодиодов изготавливается на сапфировых подложках, которые являются диэлектриками, что приводит к появлению остаточного электрического заряда и делает светодиод более чувствительным к повреждениям, вызванным электростатическим разрядом и перегрузкой.

Когда эффективность светодиодов достигнет 60...70%? Каковы перспективы повышения КПД светодиодов и модулей?

Давайте уточним, что эффективностью мы можем считать как светоотдачу (отношение светового потока к потребляемой энергии), так и стоимость одного люмена (отношение светового потока к цене светодиода или светодиодного источника света). Для улучшения обеих характеристик эффективности светодиодов существует несколько путей.

Прежде всего, это внутренний и внешний квантовый выход кристалла. На сегодняшний день высокими величинами для внешнего квантового выхода считаются 35% для синих светодиодов и 55% для красных. Внутренний выход теоретически можно приблизить к 100%. Стало быть, только за счёт повышения внешнего квантового выхода можно увеличить световую отдачу светодиодов в 2–3 раза и, соответственно, снизить цену одного люмена. С этой целью учёные ищут новые, более согласованные с кристаллической решёткой полупроводника материалы подложки. Сейчас, как известно, используется сапфир Al2O3. Карбид кремния SiC подошёл бы лучше, поскольку у него и постоянная решётки прекрасно согласована с постоянной решётки GaN, и высокая теплопроводность создаёт преимущества для отвода тепла, но он чрезвычайно

дорог. Возможно, удастся сочетать дешёвый кремний с буферными прослойками из карбида кремния. Это позволило бы совместить технологию оптоэлектронных устройств на основе нитридов с планарной технологией производства кремниевых кристаллов. Но существует проблема, которую придётся решить: карбид кремния непрозрачен, а значит, подложка не будет просветной, как сейчас, – её придётся делать зеркальной.

Существуют возможности для улучшения конструкции светодиода (см. рис. 6) и состава люминофора, но во втором случае максимальный выигрыш невелик – речь идёт о единицах процентов.

Далее, для усиления светового потока можно было бы увеличить число электронно-дырочных пар, рекомбинирующих в зоне p-n-перехода в единицу времени (см. рис. 7). Для этого необходимо увеличить ток через кристалл. Какие тут существуют ограничения?

Верхний предел плотности тока устанавливает, во-первых, снижение срока службы светодиода, а во-вторых – уменьшение квантового выхода из-за возрастания числа дефектов кристаллической решетки, на которых пары рекомбинируют без излучения. В обоих случаях причиной является нагрев кристалла и p-n-перехода. Таким образом, большое значение приобретают хороший теплоотвод, низкоомные контакты и переход на более «горячий» нитрид галлия взамен арсенида галлия. Все эти факторы позволяют повысить ток и мощность на одну лампу приблизительно в семь раз.

Если плотность тока уже максимальная, останется возможность увеличить площадь кристалла. Сейчас используются кристаллы площадью до 1 мм². Дальше пока пойти не удастся, потому что на больших контактах возникает неравномерность распределения плотности тока, локальный перегрев и, как следствие, разрушение кристалла. Использование контактов с гребенчатой структурой представляет собой проблему, потому что на контактах теряется свет. На сегодняшний день выход найден в использовании многокристалльных светодиодов.

Помимо повышения КПД самих светодиодов, можно и нужно увеличивать срок службы производимых светодиодных светильников.

