

Сергей Никифоров | sergnik71@mail.ru

Исследования параметров светодиодов CREE XLamp XP-E/XP-G/XM-L

Статья посвящена объективным и независимым исследованиям мощных светодиодов фирмы CREE для применения в освещении, проведенным в лаборатории «Л.И.С.Т». Представлен подробный анализ результатов измерений характеристик последних семейств XLamp XP-E/XP-G/XM-L, а также сравнительные данные со спецификациями производителя. Данная информация может быть полезной как для потребителей указанных типов приборов, так и для пользователей, стоящих перед выбором производителя светодиодов для использования в своей продукции.

Точка зрения

С момента появления на российском рынке твердотельной светотехники компания CREE упоминается в соответствующих кругах намного чаще остальных известных лидеров индустрии светодиодов и излучающих кристаллов. Не стал исключением и настоящий журнал, в каждом выпуске которого уже традиционно имеется статья о продукции CREE. Везде неоднократно отмечается особый, собственный стиль как продукции этой фирмы, так и средств ее продвижения на рынке. За время активной деятельности компании светодиоды CREE snискали популярность и признание своих высоких характеристик, подтверждаемых большим количеством реализованных проектов, отзывами потребителей и применением излучающих кристаллов другими известными производителями в своих приборах. Однако, как показала практика, «эхо» лабораторных достижений CREE не так уж и быстро доходит до потребителя в виде продукции с когда-то обещанными высокими характеристиками. Но даже это обстоятельство не ослабляет доверия потребителя к качеству и надежности известных светодиодов, выращенных на подложке SiC, хотя уже, в основном, переносимых на Si, особенно в России, так привыкшей в последнее время к всесторонней «неоднозначности» гарантируемых параметров любого продукта.

Есть еще один важный штрих в «почерке» продукции CREE — преемственность основных качеств от более ранних типов светодиодов к современным. И если развивать эту тему, то можно сказать, что на определенном отрезке времени, в течение которого происходит развитие конструкции и параметров семейства мощных светодиодов, CREE действует несколько прямолинейно. Со стороны кажется, что эволюция топологии и дизайна излучающих кристаллов происходит по одной схеме, однако ясно, что это не может использоваться в столь широком диапазоне плотностей тока и размеров самих кристаллов. Хотя тут трудно

утверждать однозначно: ведь любой продукт в производственном исполнении всегда упирается в компромисс стоимости, технологичности и высоких функциональных и качественных показателей. Значит, и пристальный сторонний взгляд может оказаться не всегда доходящим до корней происходящего процесса. Поэтому удобно рассмотреть эту эволюцию на уровне объективных технических характеристик, и уже по результатам этого рассмотрения сформировать собственное мнение. Последнему и посвящена настоящая работа, объединившая в себе подробные исследования параметров нескольких типов самых современных светодиодов CREE, предназначенных для использования в светотехнических устройствах.

Лабораторные методики и исследования светодиодов

Для более корректного сопоставления характеристик исследуемых светодиодов все типы были выбраны с одним излучающим кристаллом. В этом случае физика работы светодиода как устройства будет одинакова

с точностью до различия в тепловом сопротивлении корпусов и топологии кристаллов. Наряду с оценкой функциональности ставилась задача сравнения заявленных и полученных при исследовании параметров. Актуальность такого сравнения за долгие годы продвижения CREE в России, как ни странно, совершенно не снизилась. А если говорить о появлении нового продукта, то даже существенно обострилась. Зачастую только лишь разница в заявленном и полученном является предметом разногласий, потому как многие вопросы качества светодиодов в большинстве своем инженерами CREE уже решены. Это подтверждается большим количеством исследований и деградационных испытаний [1].

Одними из первых светодиодов из арсенала CREE, реально приблизившихся к отметке 100 лм с одного светодиода (при потребляемой мощности около 1 Вт), стали семейства XLamp XP-E и XLamp XP-G. Их внешний вид показан на рис. 1.

Эта серия стала удобной для применения вторичной оптики, линз-насадок, групповых линз из-за существенно меньших размеров корпусов по сравнению с предыдущими моделями. Однако значительно уменьшить размеры самого светящего тела светодиода (в виде кристалла и кремнийорганической линзы) не представляется возможным из-за размеров самих кристаллов, а именно это обстоятельство и является условием высокой эффективности работы короткофокусной оптики. И, тем не менее, уже известны светотехнические изделия на основе этих светодиодов, разрабо-

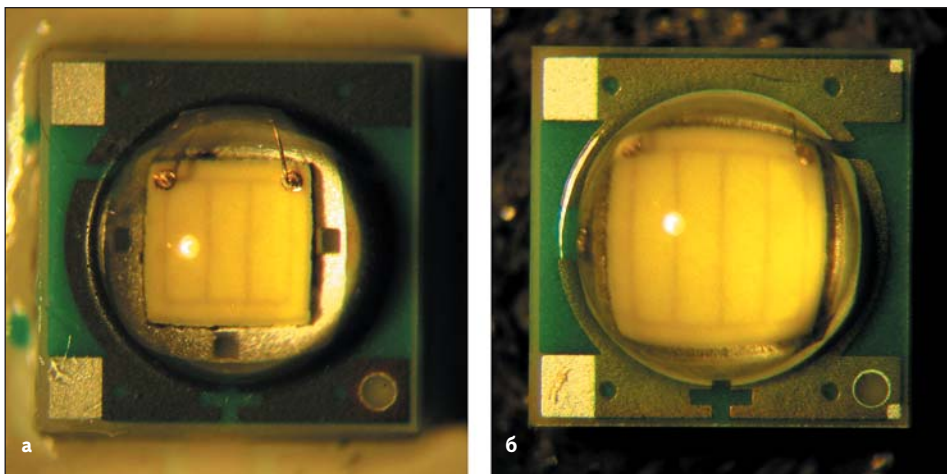


Рис. 1. Светодиоды CREE: а) XLamp XP-E WHT; б) XLamp XP-G WHT

танные и для уличного освещения, и для офисного. Применение этой серии позволило получать эффективность таких светильников вплоть до 85 лм/Вт, что на сегодня считается высоким показателем и поводом для массового применения. Но, помимо эффективности, светодиоды и устройства на их основе характеризуются целым комплексом параметров, которые в разной степени могут быть обеспечены этой линейкой приборов.

Как и в прежних исследованиях, образцы прошли измерения по целому комплексу характеристик, более 30 из которых помещены в таблицу 1. Прежде всего, следует отметить достаточно высокое приближение полученных значений параметров к заявленным. Самым интересным, конечно, является световой поток, который, в основном, отличается от «виртуальных» условий спецификации, практически не реализуемых ни одним из потребителей (при температуре активной области кристалла $T_j = +25\text{ °C}$), не более чем на 10% в сторону уменьшения. Вообще, что касается светового потока и световой эффективности,

то, вряд ли стоит указывать область несоответствия: все представленные измерения подтверждают, что она всегда «отрицательная», то есть значения этих параметров всегда ниже задекларированных.

Однако для устранения казуса «виртуальности» данных в «даташитах» о световом потоке, силе света и прямом напряжении, зависящих от температуры, инженерами CREE придумана программа расчетов параметров светодиодов в зависимости от разных температурных условий их использования (PCT, [2]). Можно выбирать как условие саму температуру $p-n$ -перехода, тогда все биновые комбинации будут соответствовать спецификации, либо указывать температуру точки пайки — T_{sp} , тогда программой в расчет будут браться значения теплового сопротивления переход-корпус и температура $p-n$ -перехода будет вычислена уже с учетом этого сопротивления. В программе используются «защитные» в нее зависимости светового потока от температуры $p-n$ -перехода, и далее, в соответствии с ними, рассчитывается окончательное значение потока. Поэтому, если

при использовании светодиода речь не идет об отрицательных температурах окружающей среды, то все, что больше $+20...+22\text{ °C}$, уже не будет соответствовать спецификации. Совершенно понятно, что такая ситуация присутствует в 99% светильников на основе светодиодов. Однако программа PCT очень удобна для проектирования светотехнических и электрических параметров устройств на светодиодах. Оценив тепловой режим своего будущего изделия, разработчик может с ее помощью быстро рассчитать необходимые параметры светодиодов и выбрать их тип и биновую комбинацию для формирования заказа. В этом пособничестве потребителю компания CREE превзошла и опередила других, компенсируя тем самым неудобные коммерческие ходы с сомнительными цифрами в «даташитах». Дальнейшим развитием взаимного понимания CREE и ее потребителя стал переход к формированию параметров спецификаций при температуре $+85\text{ °C}$ (в новых светодиодах типа XLamp® MT-G EasyWhite™), что позволит рассчитывать характеристики светотехнических устройств без дополнительных программ.

Таблица 1. Параметры светодиодов типа XLamp XP-E WHT и XLamp XP-G WHT

Тип светодиода		XPEWHT-L1-0000-00CE5 5F Q4			XPGWHT-L1-3D0-R3-0-01		
Параметры (режим 350 мА)		Полученные (при $T_j = +50\text{ °C}$)	Расчет по PCT (при $T_j = +50\text{ °C}$)	Норма по D.S. (при $T_j = +25\text{ °C}$)	Полученные (при $T_j = +50\text{ °C}$)	Расчет по PCT (при $T_j = +50\text{ °C}$)	Норма по D.S. (при $T_j = +25\text{ °C}$)
Мощность излучения, Вт		0,298			0,3733		
Световой поток, лм		89,52	94	100–107	111,43	115	122–130
Сила света максимальная, кд		29,31			32,72		
Сила света осевая, кд		28,97			32,66		
Освещенность по оси на расстоянии 2 м, лк		7,17			8,18		
Сила излучения максимальная, Вт/ср		0,096			0,1095		
Угол излучения 2Q0,5lv, град	0–0	114,87		115	126,71		125
	0–45	116,27		115	123,66		125
	45–0	115,69		115	127,79		125
	средний 2Q0,5lv	115,61		115	126,05		125
Угол излучения 2Q0,1lv, град		168,13			173,62		
Потребляемый ток, А		0,35		0,35	0,35		0,35
Напряжение питания, В		3,068	3,12	3,2	2,896	2,94	3,0
Потребляемая мощность, Вт		1,074	1,09	1,12	1,014	1,03	1,05
Световая эффективность, лм/Вт		83,37	86,2	89–95	109,93	111,7	117–124
Температура точки пайки T_{sp} , °C		40,1	40	15	43,2	43	18,7
Фотометрическое отношение, кд/кЛм		327,4			293,6		
КПД светодиода, %		27,72			36,83		
Спектральная световая эффективность, лм/Вт		301,3			298,8		
Энергетическая освещенность по оси на расстоянии 2 м, Вт/м ²		0,02			0,02		
Длина волны максимальная, нм		453,5			450		
Длина волны центроидная, нм		575,5			558		
Ширина спектра излучения по уровню 0,5P, нм		206		210	166		180
Ширина спектра излучения по уровню 0,1P, нм		295,5		300	275		280
Координаты цветности	X	0,369		0,375	0,333		0,35
	Y	0,356		0,368	0,327		0,348
	Z	0,276			0,34		
Доля ОСПЭЯ относительно V(l), %		62,3			46,9		
Коррелированная цветовая температура (CCT), К		4180,4		4000	5455,1		4800
Цветовая температура по Планку (приведенная), К		3627,5			4561		

И, тем не менее, как можно видеть из таблицы 1, даже эти расчеты все же немного «не дотянули» до реальных значений потока. Но если быть снисходительными, то можно простить эту «недотяжку» в несколько люменов и признать, что зыбкое соответствие заявленным значениям светового потока и эффективности у семейства светодиодов XLamp XP-E и XP-G было получено. Следует отметить также, что светодиоды XLamp XP-G смело перешагнули отметку «100» в обоих упомянутых номинациях. Можно даже выразить надежду на стабильность этого параметра при дальнейшем производстве, а не только в «образцовом» варианте.

Остальные параметры также оказались близки к правде, и если большинство и не указывается

в спецификации, то, по крайней мере, находится в логической взаимосвязи и поэтому не вызывает сомнений в правильности. Комментировать их нет необходимости, обо всех подробно расскажет таблица 1. Есть только лишь несколько моментов с колориметрическими и спектральными характеристиками. Это касается неравномерности координат цветности (коррелированной цветовой температуры) по углу излучения светодиода. Однако к этой проблеме также стоит относиться философски, поскольку данная «штука» имеется у продукции CREE, что называется, «с рождения» и можно лишь констатировать разную степень ее проявления в том или ином продукте. Здесь присутствует одно очень важное обстоятельство с точки зрения метрологии и правильности декларирования цветности белых светодиодов

на основе люминофоров и кристаллов синего цвета излучения. Надпись в «даташите» в виде присвоенного тому или иному светодиоду значения цветовой температуры (бина по координатам цветности) следует читать так: в любой точке пространственного распределения силы света (фотометрического тела) светодиода цветная температура не может выходить за рамки, ограниченные этим бином (разбросом значений цветовой температуры). Это утверждение содержит важную логику: колориметрические параметры должны обеспечиваться во всем пространстве, независимо от угла наблюдения, и не иметь несоответствия, даже если речь идет о потоке, заключенном образующей телесного угла в 1°, являющейся условием «стандартного наблюдателя» МКО. И этот 1° может оказаться где угодно, в любой точке полусферы излучения светодиода, а наблюдение с этой точки будет для глаза наблюдателя выглядеть как свет иного цвета относительно других точек наблюдения. В этом и состоит принцип сортировки и разделения на разные ранки по оттенку, а неравномерность сверх допустимого (выход за рамки бина) сводит на нет такую сортировку и всю ее идею целиком. Поэтому утверждения некоторых отечественных специалистов «от метрологии» о том, что цветность необходимо измерять «по потоку», то есть при условии перемешивания всего излучения и измерения его параметров как среднего значения из всего суммарного светового потока, в корне неправильны. Глаз наблюдателя интегрирует поток только в телесном угле, соответствующем образующей его в 1°, а не в 2π ср. А именно такие измерения, как правило, и происходят в заводских лабораториях производств, имеющих стандартный набор метрологических средств в виде сферического интегратора (фотометрического шара), в котором одновременно измеряются и световой поток, и координаты цветности. Соответственно, выход цветности за рамки, определенные ранком, хоть даже и в одной-единственной точке пространства излучения светодиода, справедливо считается несоответствием этому ранку. Отсюда и непонимание проблемы или «создание вида» ее непонимания. Кстати, сортировочная машина на конвейере, как правило, также содержит в виде средства измерения сферический интегратор, поэтому и бин по цветовой температуре может вовсе не соответствовать реальной цветности в большинстве точек фотометрического тела. Любая оптика усугубляет это обстоятельство, поэтому с применением линз неравномерность растет. Однако применительно к изучаемым светодиодам, не содержащим столь значимой оптической системы, можно сказать, что неравномерность колориметрических параметров по углу излучения не имеет катастрофических размеров, хотя и явно «выпадает» за пределы, ограниченные в «даташите».

На графиках рис. 2 можно заметить, что по углу излучения от оси (0–0) до почти прямого угла (0–80) цветная температура составляет от 500 до 800 К в зависимости от типа светодиодов. Прямые, характеризующие зависимость координат цветности от угла излучения на рис. 2а, с расположением точки ±45 в их середине (у светодиодов XLamp XP-E), или значения цве-

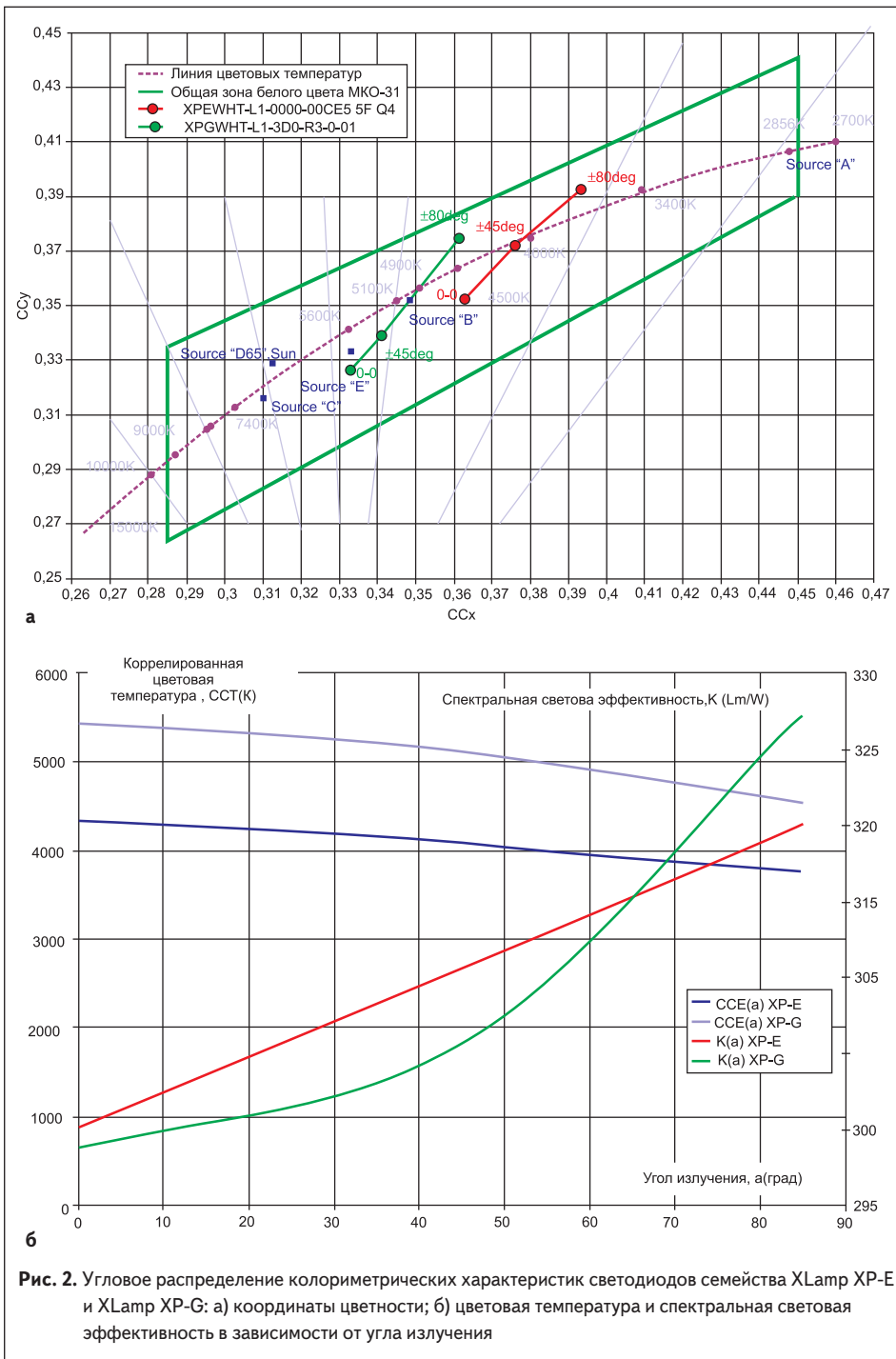


Рис. 2. Угловое распределение колориметрических характеристик светодиодов семейства XLamp XP-E и XLamp XP-G: а) координаты цветности; б) цветная температура и спектральная световая эффективность в зависимости от угла излучения

товой температуры на рис. 26 свидетельствуют о приблизительно линейном изменении этих параметров в зависимости от угла наблюдения и таком же распределении долей интегрального светового потока соответствующей цветности. Поэтому значения параметров в этой точке могут считаться паспортными. Если вернуться к таблице 1, то можно заметить, что у светодиодов XLamp XP-E наблюдается практически полное совпадение (4180 и 4000 К), а у приборов XLamp XP-G заявленная цветовая температура появляется только на крайних углах обзора, а в центре существенно выше (5455 К против 4800 заявленных). В результате это обстоятельство позволяет сделать следующий вывод: если производитель декларирует некую световую эффективность при определенной цветовой температуре, то при условии изменения последней эффективность уже не будет соответствовать заявленной. В случае с исследуемыми образцами итог получился снова в пользу производителя: цветовая температура выше, выше и эффективность. А это значит, что если все привести к заявленному (то есть снизить цветовую температуру), то не будет тех высоких показателей, которые получились в результате исследования, а светодиоды, едва «дотянувшие» до «даташита» по световому потоку, явно не достигнут его.

Изменение значения спектральной световой эффективности (ССЭ) (рис. 26), пропорциональное изменению спектра излучения в зависимости от угла наблюдения (рис. 3), показывает, что у светодиодов XLamp XP-G, помимо линейного уменьшения доли синего к крайним углам, изменяется (имеется нелинейность) еще и спектр излучения длинноволновой, люминофорной части. Это подтверждается и нелинейной формой зависимости ССЭ для XLamp XP-G на графике рис. 26.

Важная часть программы РСТ посвящена электрическим характеристикам. Исходя из расчетов прямого напряжения светодиода, основных, как говорилось выше, на его зависимости от температуры $p-n$ -перехода, получают значения потребляемой мощности и световой эффективности. Поэтому по результатам измерений прямого напряжения, выполненным в исследовании, можно косвенно судить о том, насколько расходятся расчеты с помощью программы и какова реальность, имеющаяся в произведенных светодиодах. Если снова обратиться к таблице 1, то можно заметить, что у обоих типов светодиодов рассчитанные с помощью РСТ прямые напряжения при приведенных там температурах точки пайки отличаются примерно на 50 мВ (полученные значения ниже расчетных). Это говорит либо о том, что реальная температура активной области кристалла приблизительно на 15–20 °С выше рассчитанной, либо о том, что прямое напряжение светодиода при +25 °С ниже 3,2 В, обозначенных в даташите.

Вероятно, разработчики отдали эту разницу падению напряжения на контактных проводниках, местах их приварки и т. д., а может, просто заложили в расчеты несоответствующее значение теплового сопротивления. Так или иначе, наше исследование выявило этот момент,

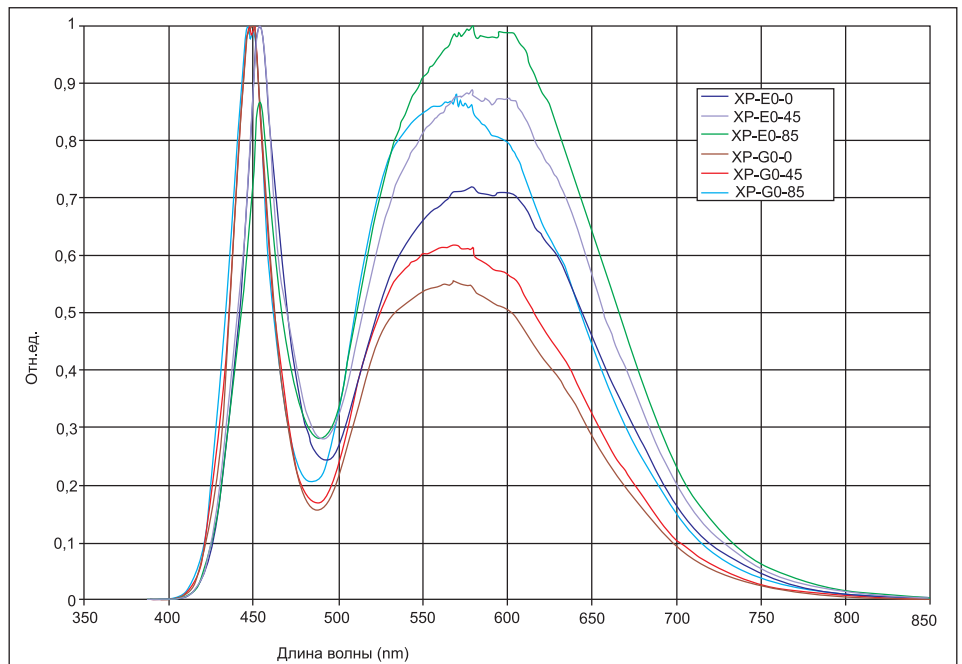


Рис. 3. Относительный спектральный состав излучения светодиодов Cree типа XLamp XP-E и XLamp XP-G в зависимости от угла направления излучения (указан на сноске)

и он может быть использован для коррекции расчетов параметров программой РСТ.

Продолжением и развитием конструктивных и идейных начинаний, выполненных в светодиодах серий XLamp XP-E и XLamp XP-G, является новинка — мощный однокристальный светодиод XLamp XM-L, способный, судя по спецификации, работать даже при 3000 мА. Внешний вид его показан на рис. 4.

Поскольку все параметры этих светодиодов в спецификации указаны в режиме работы при токе 700 мА, исследования и расчеты велись при двух значениях прямого тока: 0,7 и 0,35 А. Тем самым можно сравнивать характеристики этой серии светодиодов с предыдущими типами, параметры которых нормированы при 350 мА.

Даже при беглом изучении таблицы 2, где показаны все результаты измерений и данные спецификаций, можно сделать вывод, что приборы этой серии существенно превос-

ходят своих предшественников по многим позициям. Здесь уже не обсуждается просто значение 100 лм/Вт, оно имеется даже при 700 мА, не говоря уже про 350. Соответственно, значение светового потока при 700 мА «переваливает» за 200 лм. Вероятно, такие показатели на фоне предыдущих много могут позволить простить — даже то, что некоторых снова «не хватает» до заветных значений в спецификации, но все же параллельный анализ будет уместен.

О степени соответствия полученных значений светового потока и эффективности расчетам и декларациям красноречиво говорят первые строки таблицы 2. Результаты и выводы аналогичны приведенным по предыдущим типам светодиодов. Однако по каким-то непонятным причинам углы излучения по уровню $0,5I_{\text{max}}$ у обоих типов светодиодов недобирают почти 10° относительно «даташита». Вряд ли это некое серьезное стратегическое

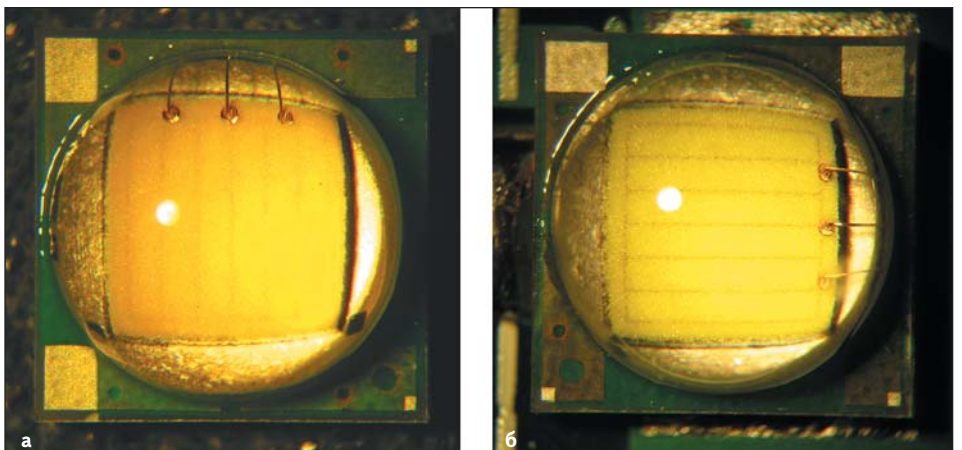


Рис. 4. Светодиоды Cree типа: а) XLamp XM-L WHT «теплый белый»; б) XLamp XM-L WHT «холодный белый»

несоответствие, но обычно угловые характеристики выдерживаются продукцией CREE всегда. Сказаться такой недочет может лишь при проектировании вторичной оптики или расчетов каких-нибудь специальных диаграмм углового распределения силы света, например для уличного освещения.

Если двигаться вниз по параметрам, помещенным в таблице 2 (где указаны электрические характеристики), то можно заметить, что там имеется два типа измеренного прямого напряжения: в импульсном режиме и в статическом. Это измерение делает косвенную оценку температурного режима работы излучающего кристалла независимой от расчета программы РСТ и бина светодиода по напряжению. Таким образом, полученные значения

напряжения оказываются: одно — при температуре кристалла $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$, как в спецификации (импульсный режим), другое — определенное по формуле:

$$T_{sp} = T_j + R_p$$

где T_j — температура p - n -перехода $+25\text{ }^\circ\text{C}$, R_p — тепловое сопротивление p - n -переход–корпус $2,5^\circ/\text{Вт}$ («даташит»).

В случае режима 350 мА, когда светодиод потребляет мощность ровно 1 Вт (из данных измерений), перегрев активной области кристалла должен составить $2,5\text{ }^\circ\text{C}$, что будет соответствовать уменьшению прямого напряжения примерно на 7–8 мВ. Если учесть температуру точки пайки, приведенную в та-

блице 2, то можно заметить, что разница в прямом напряжении составляет как раз величину, эквивалентную разности температур, плюс приходящиеся 7–8 мВ на тепловое сопротивление. Ситуация повторяется и при измерении напряжений в режиме 700 мА (при поправке на соответствующую при этом потребляемую мощность). Это свидетельствует о корректности указанного значения теплового сопротивления, а значит, и расчетов всех величин по программе РСТ. Соответственно, рассчитанные значения светового потока и эффективности должны быть достоверными и не совпали в реальных исследованиях не по причине неверного расчета, а именно из-за фактической недостачи того или иного параметра. Однако, как и в варианте с предыдущи-

Таблица 2. Параметры светодиодов типа XLamp XM-L WHT «теплый белый» и «холодный белый»

Тип светодиода		Холодный белый XMLAWT-0-T60-2S0-00-0001					Теплый белый XMLAWT00-000-000-00LT30E7-7C				
Параметры I		Полученные (при $T_j = +36\text{ }^\circ\text{C}$)	Расчет по РСТ (при $T_j = +36\text{ }^\circ\text{C}$)	Полученные (при $T_j = +54\text{ }^\circ\text{C}$)	Расчет по РСТ (при $T_j = +54\text{ }^\circ\text{C}$)	Норма по D.S. (при $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$)	Полученные (при $T_j = +38\text{ }^\circ\text{C}$)	Расчет по РСТ (при $T_j = +38\text{ }^\circ\text{C}$)	Полученные (при $T_j = +54\text{ }^\circ\text{C}$)	Расчет по РСТ (при $T_j = +54\text{ }^\circ\text{C}$)	Норма по D.S. (при $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$)
Режим I, мА		350	350	700	700	700	350	350	700	700	700
Мощность излучения, Вт		0,457		0,85			0,347		0,653		
Световой поток, лм		136,37	141	253,79	262	280–300	106,75	110	200,62	206	220–240
Сила света максимальная, кд		44,35		83,13			35,06		65,75		
Сила света осевая, кд		44,33		82,88			35,04		65,64		
Освещенность по оси на расстоянии 2 м, лк		11,1		20,8			8,75		16,4		
Сила излучения максимальная, Вт/ср		0,149		0,278			0,114		0,214		
Угол излучения 2Q0,5lv, град		0–0	117,91		116,99		125	117,04		116,58	125
		0–45	118,37		117,78		125	116,35		115,81	125
		45–0	117,21		116,65		125	117,04		116,47	125
		средний 2Q0,5lv	117,83		117,14		125	116,81		116,29	125
Угол излучения 2Q0,1lv, град		162,85		162,58			163,84		163,5		
Потребляемый ток, А		0,35	0,35	0,7	0,7	0,7	0,35	0,35	0,7	0,7	0,7
Напряжение питания статическое, В		2,861	2,73	2,989	2,81	2,9	2,764	2,73	2,845	2,81	2,9
Напряжение питания импульсное, В		2,898	2,77	3,018	2,9	2,9	2,787	2,77	2,891	2,9	2,9
Потребляемая мощность, Вт		1,014	0,96	2,092	1,97	2,03	0,98	0,96	1,99	1,97	2,03
Световая эффективность, лм/Вт		136,19	146,9	121,30	133	138–148	110,35	114,60	100,74	104,6	108–118
Температура точки пайки T_{sp} , $^\circ\text{C}$		33,6	34	48,8	49	20	35,8	36	48,7	49	20
Фотометрическое отношение, кд/кЛм		325,3		327,6			328,4		327,7		
КПД светодиода, %		45,05		40,64			35,61		32,78		
Спектральная световая эффективность, лм/Вт		298,57		296,07			307,63		302,56		
Энергетическая освещенность по оси на расстоянии 2 м, Вт/м ²		0,03		0,06			0,02		0,04		
Длина волны максимальная, нм		442,5		442,5			604,5		604		
Длина волны центроидная, нм		538,5		534,5			593		592		
Ширина спектра излучения по уровню 0,5P, нм		20,5		20,5		23	224		223,5		220
Ширина спектра излучения по уровню 0,1P, нм		237		235		250	304,5		304		300
Координаты цветности		X	0,301		0,299		0,325	0,423		0,42	0,442
		Y	0,303		0,301		0,355	0,383		0,378	0,415
		Z	0,396		0,4			0,194		0,202	
Доля ОСПЭЯ отн. V(l), %		30,48		30,01			69,82		67,9		
Коррелированная цветовая температура (CCT), К		7630,7		7652,7		5900	3055,8		3072,4		3000
Цветовая температура по Планку (приведенная), К		7142		7149			2854,5		2842,3		

ми типами образцов, несоответствия не столь велики (менее 10 лм по световому потоку) и на них также можно закрыть глаза, списав на погрешность измерений. Гораздо большее расхождение имеется лишь по световой эффективности (доходит до 15 лм/Вт) — и то только на больших токах.

А вот с цветностью у XLamp XM-L WHT холодного белого цвета имеются существенные расхождения. Если следовать описанным ранее выкладкам, то полученные в исследовании световые эффективности именно для этого цвета фактически должны быть существенно выше. Это объясняется тем, что коррелированная цветовая температура превышает за-

явленную почти на 2000 К. Соответственно, значение эффективности излучения при такой цветности будет на 10–15% больше, а с учетом полученных значений (которые ниже заявленных на 12% (табл. 2)) несовпадение с «даташитом» в сторону уменьшения составит около 25%. А это уже ощутимо.

Далее следует провести аналогии и с неравномерностью координат цветности по углу излучения. Эти зависимости приведены на рис. 5.

Можно заметить, что отраженные и в таблице 2, и на графике рис. 5б значения цветовой температуры теплого белого практически не имеют зависимости от угла излучения и плот-

ности тока через кристалл и вдобавок совпадают с «даташитом». Здесь можно констатировать полное соответствие. Зато XLamp XM-L WHT в холодном белом варианте занимает сразу несколько рангов по координатам цветности в зависимости от угла наблюдения. Разброс координат составляет по X — до 0,4, по Y — до 0,9 (рис. 5а), значение разброса ССЭ составляет около 60 лм/Вт. Для наглядности рассуждений приведен рис. 6, на котором показаны относительные спектральные распределения светового потока при различных углах излучения. Стоит отметить высокую стабильность длинноволновой, люминофорной части спектра, которая оказалась абсолютно независимой от угла наблюдения, а значит и от положения производящего его люминофора на плоскости излучающего кристалла. Соответственно, все изменения цветности такого характера здесь связаны исключительно с геометрией прохождения лучей от кристалла через люминофорное покрытие, которое определяет «весовую» долю синего в общем спектре конкретного направления излучения. В таких случаях говорят: «Так и должно быть».

Однако если отбросить сведения о спектральном составе и связанных с этим несоответствиях с «даташитом» и обратить внимание на значение КПД светодиодов (табл. 2), показывающее эффективность преобразования электроэнергии в свет, то можно заметить, что уже в белом свете оно составляет величину более 45% при плотности тока около 40 А/см² и около 40% — при 75 А/см². Соответственно, без люминофора это значение составит не менее 50%. На сегодня это очень высокий показатель КПД работы гетероструктуры при таких плотностях тока и всей конструкции излучающего кристалла, с его внутренними отражениями и проблемами внешнего квантового выхода.

Выводы

В результате проведенных исследований были получены подробные реальные характеристики светодиодов CREE типа XLamp XP-E WHT, XLamp XP-G WHT и XLamp XM-L WHT. В той или иной степени результаты измерений приблизились к заявленным в спецификациях значениям. Однако не только задача сравнения стояла перед исследователями: интерес представлял сам факт анализа данных со столь высокими фотометрическими характеристиками образцов. Следует отметить, что, судя по полученным характеристикам, компании CREE удалось достичь одних из самых высоких на сегодня показателей эффективности преобразования электрической мощности в свет. И, хотя световая эффективность составляет уже более 100 лм/Вт при высоких плотностях тока (до 80 А/см²), а значение светового потока одного светодиода при этом уже перешагнуло за 200 лм, все же остались в новом приборе XLamp XM-L некоторые прежние, переходящие от продукта к продукту и традиционные для CREE «ложки дегтя». Как было сказано выше, это суще-

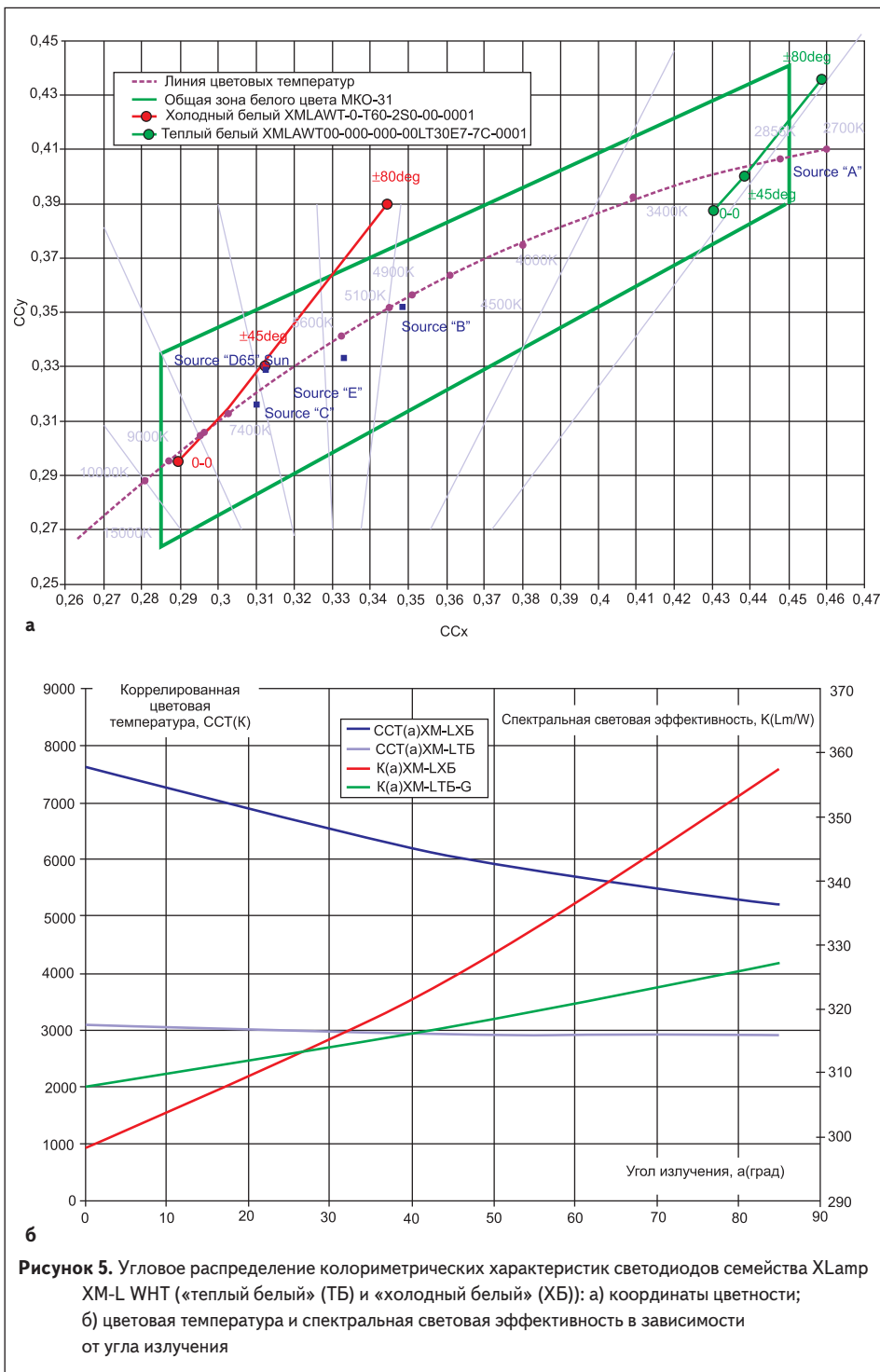
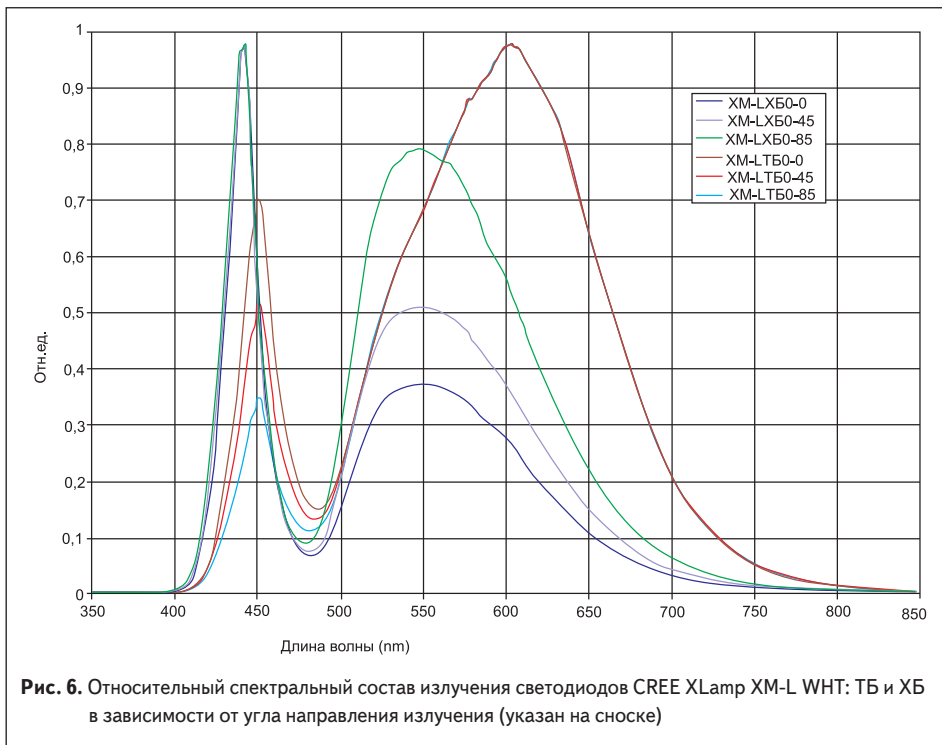


Рисунок 5. Угловое распределение колориметрических характеристик светодиодов семейства XLamp XM-L WHT («теплый белый» (ТБ) и «холодный белый» (ХБ)): а) координаты цветности; б) цветовая температура и спектральная световая эффективность в зависимости от угла излучения



ственная неравномерность колориметрических характеристик в зависимости от угла излучения, влекущая за собой изменение среднего, интегрального значения коррелированной цветовой температуры излучаемого светового потока.

Несколько слов стоит сказать и о возможности светодиодов типа XLamp XM-L работать при высоких плотностях тока (по данным спецификации — до 3000 мА). Применение излучающего кристалла с большой площадью *p-n*-перехода предъявляет особые требования к топологии контактов на его поверхности и соответствующему распределению напряженности приложенного к кристаллу внешнего электрического поля. Здесь вся схема распределения потенциала работает как система параллельного включения секторов кристалла (эквивалентных отдельным диодам) с отличающимися значениями прямого напряжения [3]. Совершенно понятно, что из-за этого всегда имеется неравномерность плотности тока по площади *p-n*-перехода или кристалла. Соответственно, с увеличением обще-

го прямого тока через кристалл (прямого приложенного напряжения) неравномерность плотности тока значительно увеличивается, что, как правило, и приводит к деградационным явлениям вообще, а в первую очередь — у секторов с большим ее значением [3]. Причем в [3] определено, что значения неравномерности могут достигать до нескольких раз. Имея в виду все сказанное, топологию контактов излучающего кристалла и вариант подсоединения его контактными нитями, показанный на рис. 4, можно сделать вывод о том, что по всем трем имеющимся проводникам протекает ток различной плотности. В результате существует теоретическая вероятность того, что при определенном суммарном его значении ток перераспределится между нитями так, что одна из них просто не выдержит и расплавится в самом слабом месте. Далее, по степени и в пропорции распределения потенциала по площади кристалла, соответственно перераспределится плотность тока и в других нитях, причем значение прямого тока в сумме останется постоянным. Это мгновенно

повлечет за собой последовательное перегорание оставшихся нитей как принявших всю нагрузку на себя, и общая цепь питания светодиода прервется.

Вероятно, этот сымитированный сценарий развития ситуации с питанием светодиода повышенным током не раз был рассмотрен инженерами Cree и максимально учтен в конструкции, но, как показывает приведенное рассуждение, его реальное воплощение вполне возможно. А может, эту последовательность событий им еще только предстоит учесть...

Стоит также отметить, что представленные результаты исследований в большей степени подтвердили особенность продукции производства Cree — никогда не достигать заявленных значений светового потока и световой эффективности. И хотя в нашем случае было получено минимальное расхождение (сравнимое с точностью измерений), все же потребителю гораздо приятнее иметь несколько «лишних» люменов к значению в «даташите». И, как ни парадоксально, именно это как раз и станет существенным конкурентным преимуществом, в отличие от постоянного сравнения состояния дел с весами рыночных торговцев, которые обязательно покажут, что вес одного литра воды — 1,5 кг.

В заключение следует подчеркнуть, что, несмотря на определенные моменты (в природе ничто не лишено недостатков), новый светодиод XLamp XM-L вобрал в себя все научно-производственные достижения компании Cree, и, безусловно, является важным звеном в развитии следующих поколений мощных светодиодов для освещения. ●

Литература

1. Никифоров С. Г. Если бы молодость знала, если бы старость могла // Полупроводниковая светотехника. 2010. № 6.
2. www.cree.com.
3. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // 5-я Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия: структуры и приборы». Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. Москва, 31 января — 02 февраля 2007 г.