

# Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp

Статья посвящена исследованиям параметров семейства светодиодов Cree XLamp белого цвета свечения и может быть полезна разработчикам полупроводниковых устройств на основе твердотельных источников света и светотехникам. Представлены результаты измерений и расчетов характеристик реальных образцов светодиодов в их сравнении с данными спецификаций производителя. Указаны проблемы и особенности применения в устройствах освещения и подсветки. Рассмотрены физические основы работы белых светодиодов с применением люминофора. На основе деградационных характеристик показаны изменения значений некоторых параметров со временем наработки и установлены возможные причины деградации. Отмечена важность исследований реальных образцов для новых разработок.

Сергей НИКИФОРОВ  
nikiforov@screens.ru

## Технология и применение

Появление на мировом рынке нового поколения светодиодов белого цвета свечения на основе кристаллов фирмы Cree на карбид-кремниевых (SiC) подложках открыло целое направление в разработке устройств для освещения и подсветки, использующих твердотельные источники света. Высокие энергетические показатели излучения этих светодиодов позволяют строить на их основе надежные и экономичные светильники самого ответственного применения (например, аварийное и взрывобезопасное освещение), работающие в широком диапазоне температур [1].

Совершенствование технологии производства всех компонентов, составляющих светодиоды типа Cree XLamp XL7090 и Cree XLamp XR7090 (излучающие кристаллы, метод их установки на эвтектическую основу, линзы из кварцевого стекла, корпуса из специальной керамики, люминофорное покрытие кристалла), действительно, существенно повысило надежность, энергетический выход излучения и коэффициент полезного использования светового потока. В этих светодиодах уменьшено тепловое сопротивление «*p-n*-переход–корпус», которое, по данным производителя, составляет не более 8 °C/Вт [1].

Все эти новшества стали возможными после начала промышленного использования кристаллов семейства Cree XB на подложке SiC. Достоинством этих кристаллов является возможность монтажа с применением эвтектического сплава, обеспечивающего максимальный отвод тепла от *p-n*-перехода, который расположен на расстоянии 2–3 мкм от омического контакта кристалла [1, 2]. Применение этой технологии при производ-

стве кристаллов большого размера (0,9×0,9 мм) позволил достичь высокого (по данным производителя — более 100 [1]), соотношения светового потока к мощности, например, за счет значительного уменьшения прямого напряжения  $U_f$  при стандартных плотностях тока в 45–50 А/см<sup>2</sup>, не только из-за построения структуры излучающего кристалла в виде набора параллельно включенных участков *p-n*-перехода, но и благодаря равномерному растеканию тока по объему материала кристалла. Это обеспечивается упомянутым ранее омическим контактом, занимающим всю площадь нижнего торца кристалла и, соответственно, создающим равномерное распределение напряженности электрического поля по площади *p-n*-перехода. Стоит также отметить и то, что проводимость эвтектического соединения значительно выше проводимости токопроводящего эпоксидного, что особенно сказывается на больших плотностях тока (до 90 А/см<sup>2</sup>) и также способствует минимизации прямого напряжения  $U_f$ . Увеличение световой отдачи достигается и за счет оптимизации формы самого излучающего кристалла, позволяющей более эффективно выводить излучение за его пределы.

Как обычно, появление новых светодиодов вызвало волну повышенного внимания специалистов и разработчиков, а различного рода тесты на соответствие параметров были более пристрастными. Забегая вперед, следует отметить, что наряду с подтвердившимися достоинствами новых разработок, детальные исследования коммерческих образцов «с конвейера» показали, что у них имеются и ряд существенных особенностей, которые можно отнести как к недоработкам, так и к типичным недостаткам, свойственным

подобным типам приборов других производителей.

Настоящая статья имеет своей целью, прежде всего, объединить усилия по совершенствованию подобных изделий, а также поднимает вопросы о проблемах использования светодиодов с учетом соответствия их реальных характеристик заявленным производителем. В основу данной публикации положен масштабный эксперимент по исследованию параметров семейства светодиодов Cree XLamp белого цвета с детальным изучением деградационных характеристик этих параметров в течение не менее 8000 часов наработки, что соответствует приблизительно 1 году непрерывной работы.

## Как относится люмен к ватту?

Говоря о полупроводниковых источниках белого света, стоит напомнить, что получение белого цвета излучения основано на преобразовании спектрального состава первичного излучения с помощью люминофора. Первичным, в данном случае, является излучение, производимое кристаллом на основе гетероструктуры AlInGaN в области синего цвета, преимущественно с доминирующими длинами волн в диапазоне 450–465 нм и полушириной 18–25 нм [3]. При таком преобразовании происходит существенное увеличение ширины спектрального распределения за счет добавления переизлученной люминофором оптической мощности, особенно в области желтого и красного цвета (рис. 1).

Положение спектра излучения белого светодиода показано относительно кривой видности МКО для оценки степени эффективно-

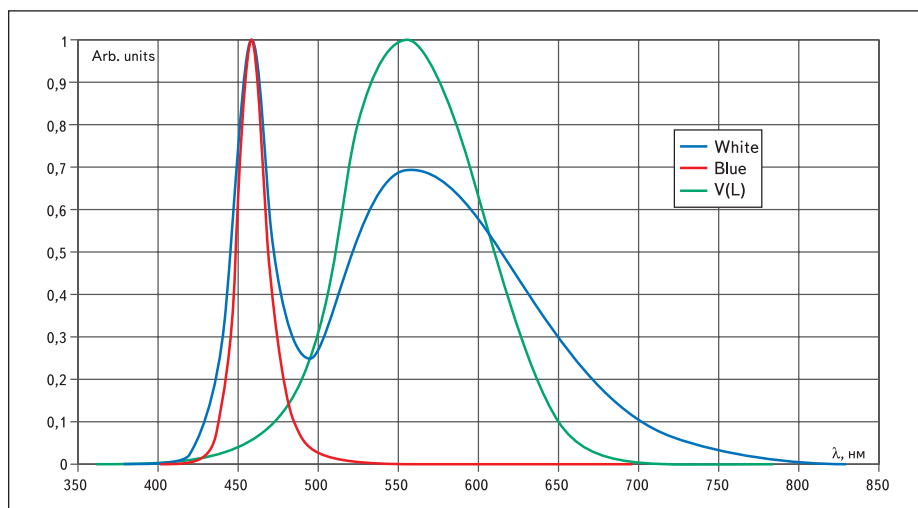


Рис. 1. Спектры излучения: исходного кристалла синего свечения (красная линия), белого светодиода с люминофором на его основе (синяя линия), кривая видности по МКО (зеленая линия)

сти восприятия его глазом. Смещение основной доли спектра в центр кривой видности, где чувствительность глаза максимальна, и является основой эффекта преобразования люминофора. Суммарный спектр такой комбинации кристалла и люминофора получается гораздо более широким и заполненным, чем, например, спектр вольтовой дуги в среде ксенона или даже люминесцентной лампы. Однако, как будет рассмотрено далее, этот факт следует трактовать с некоторыми оговорками. Таким образом, поведение некоторых характеристик белых светодиодов будет неизбежно определяться изменением соответствующих параметров исходного кристалла с излучением синего цвета, поэтому сначала стоит рассмотреть его характеристики.

На рис. 2 приведены зависимости отношения «люмен — потребляемый ватт» (далее — лм/Вт) от плотности тока через кристалл.

Удобство представления этих зависимостей именно от плотности тока через кристалл,

а не от его значения, определяется тем, что в этом случае характеристики получаются не связанными с геометрическим размером кристаллов, что позволяет оценивать их абсолютную эффективность. Данное утверждение справедливо и для рассмотрения светодиодов белого цвета свечения на основе кристаллов типа Cree MBright, имеющих размеры  $0,3 \times 0,3$  мм, и XB900-S9000A с размерами  $0,9 \times 0,9$  мм, зависимости для которых и показаны на рис. 2.

Из графиков можно заметить, что с одной стороны, отношение лм/Вт при одинаковой плотности тока у кристаллов меньшего размера существенно меньше, а эффективность излучения, или коэффициент полезного действия, напротив, значительно больше. Это показывает, что построение системы «кристалл — преизлучатель» с использованием люминофора на некотором количестве кристаллов меньшего размера наиболее выгодно с точки зрения использования электрической

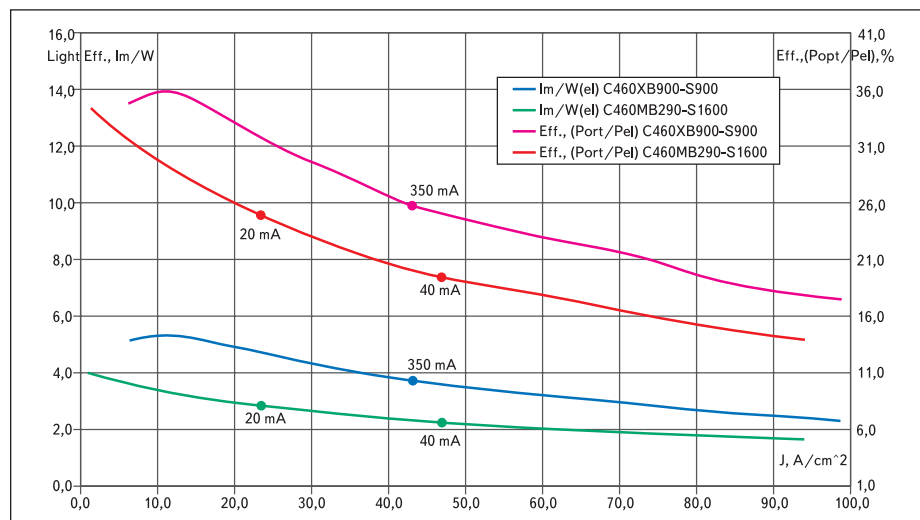
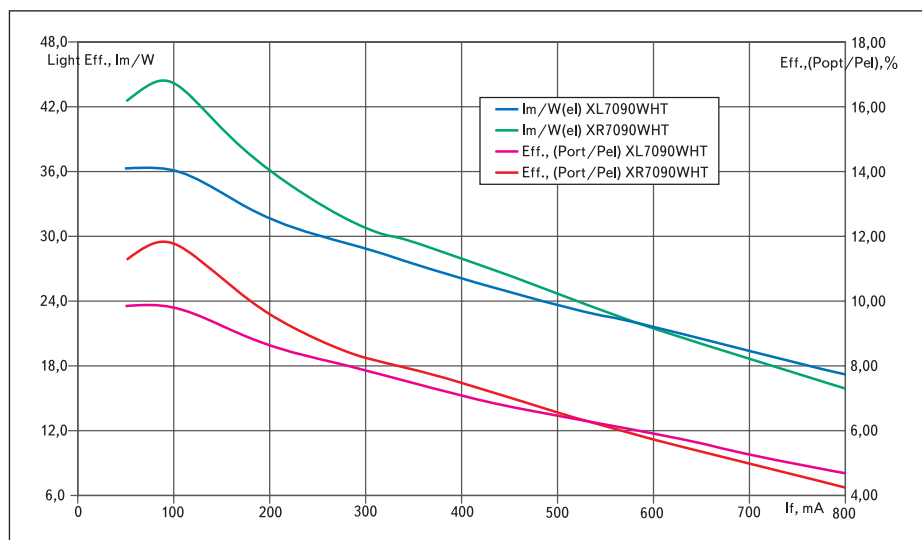


Рис. 2. Зависимости отношения лм/Вт и коэффициента полезного действия (Port/Pel) от плотности тока через кристалл J для различных типов кристаллов на основе AlInGaN производства фирмы Cree

мощности по сравнению с применением одного большого кристалла.

Однако наиболее важный вывод, который можно сделать из диаграмм на рис. 2, заключается в том, что тенденция снижения эффективности излучения с ростом плотности тока через кристалл имеет определенный характер и не зависит от его размера. Можно заметить, что квантовая эффективность, или светоотдача, как еще называют иногда этот параметр, всегда максимальна при малых плотностях тока и снижается более чем вдвое при достижении предельно возможных значений тока. В реальных условиях это снижение обусловлено, прежде всего, доминирующим действием разогревающего эффекта при прохождении тока через структуру. Выигрышным окажется конструкция излучающего кристалла с минимальным тепловым сопротивлением, позволяющим снизить разогрев. Увеличение эффективности отвода тепла является приоритетным направлением в разработке структур и технологий их производства, и именно в этом направлении ведутся исследования в компании Cree. Определено также, что дальнейшее совершенствование излучающих структур на основе AlInGaN и подложках SiC, известное под маркой «кристаллы типа EZR», имеет схожую зависимость квантовой эффективности, что и у их предшественников (рис. 2). Различие в том, что за счет конструкции кристалла снижение эффективности излучения наблюдается только на значительно больших токах, из-за описанного выше меньшего теплового сопротивления. Это позволяет получать высокий КПД структуры (до 50%) при большой плотности тока через нее и существенно повысить надежность и срок службы светодиода в целом. Точно такую же характеристику эффективности излучения можно проследить и на графиках, представленных на рис. 3, которые получены для двух типов светодиодов белого цвета свечения семейства Cree XLamp. Следует отметить и хорошо заметный на этих рисунках экстремум на линиях графиков отношений лм/Вт при малых значениях плотности тока, который характерен только для кристаллов типа XB900-S9000A и наблюдается также у варианта исполнения с люминофором. Вероятно, это связано с «резонансной» характеристикой работы системы параллельных структур кристалла, имеющего большую площадь активной области с определенным количеством и размером квантовых ям, квантовый выход которых имеет максимум лишь при определенной степени инжекции (или прямого напряжения). При больших плотностях тока (с увеличением внешнего приложенного электрического поля) начинают сказываться и доминировать другие факторы, которые и снижают эффективность работы такой системы: последовательное сопротивление, безизлучательная рекомбинация, разогрев, неравномерность плотности тока по объему кристалла. Увеличение приложенной электрической мощности не вы-



**Рис. 3.** Зависимости отношения лм/Вт и коэффициента полезного действия (Port/Pel) от прямого тока If через кристалл для различных типов светодиодов Cree XLamp белого цвета свечения XL7090WHT и XR7090WHT на основе кристаллов XB900-S9000A

зывает соответствующего пропорционального увеличения квантового выхода, поэтому результирующая эффективность падает. Следовательно, перед создателями излучающих структур большой мощности стоит основная задача увеличения эффективности излучения именно при высоких плотностях тока.

Сопоставляя значения параметра лм/Вт, обозначенные на рис. 3, можно определить коэффициент преобразования люминофора по световому потоку (табл. 1).

Если световой поток исходного кристалла синего света равен 11,5 лм при 350 мА, то при той же плотности тока поток белого излучения с люминофором на основе этого же кристалла будет, по данным измерений, в 3 раза больше (около 34,5 лм — см. табл. 1). Исходя из этого, а также принимая во внимание указанное в спецификации значение выходной оптической мощности кристаллов C460XB900-S9000A (165 мВт) [1], на основе которых построены белые светодиоды, через пересчет этой мощности в световой поток и умножение на коэффициент преобразования люминофора, можно получить значение 45–50 лм при потреблении около 1 Вт электрической мощности (350 мА, 3,3 В), что

и в действительности подтверждается измерениями. В различных вариантах исполнения белых светодиодов с люминофором соотношение полученного белого светового потока и исходного синего может достигать до 5, и как правило, в большинстве светодиодов известных фирм имеет значение не менее 4, что свидетельствует о качестве люминофора и степени соответствия его свойств характеристикам исходного синего кристалла. Максимальный коэффициент преобразования светового потока можно наблюдать в светодиодах фирмы Nichia с кристаллами на подложках из сапфира. Постоянство этого коэффициента не зависит от плотности тока на основном участке характеристики при изменяющемся отношении лм/Вт, как видно из таблицы 1, и указывает на то, что этот коэффициент зависит только от преобразующего действия люминофора и не связан с другими факторами, влияющими на изменение суммарного светового потока.

По таблице 1 также можно оценить потери оптической мощности при переходе от синего к белому с помощью того же люминофора. Как видно, потери могут составить до 25% при различной плотности тока. Это может быть связано как с потерями непосредственно при переизлучении люминофора (часть оптической мощности не выходит за пределы люминофора и тратится на преобразование), так и с изменением спектрального состава излучения синего кристалла при изменении тока [4]. Преобразование спектрального состава излучения выражается в изменении коэффициента относительной спектральной световой эффективности приблизительно во столько же раз, во сколько изменяется коэффициент преобразования светового потока.

Возвращаясь к задаче оптимизации выхода светового потока при больших плотностях тока, стоит обратить внимание на приводи-

мые в спецификациях на светодиоды семейства Cree XLamp значения отношений лм/Вт. Последние сообщения говорят не только о преодолении «психологического барьера» в 100 лм/Вт, но и достижении значения 131 лм/Вт [1]. Теперь попробуем разобраться в этих данных, с учетом сказанного о механизме работы белых светодиодов. Следуя измерениям и расчетам характеристик реальных светодиодов различных «бинов» или «ранков», которые отражены в таблицах 1 и 2, можно заметить, что для достижения светового потока в 100 лм необходима оптическая мощность синего кристалла, равная приблизительно 400 мВт (1):

$$P_b = \Phi/K + N. \quad (1)$$

Здесь  $\Phi$  — световой поток 100 лм;  $K$  — относительная спектральная световая эффективность, равная в среднем 320–360 лм/Вт для этого типа светодиодов;  $N = (\Phi/K) \times 0,25$  — потери на преобразование (не менее 25% оптической мощности).

В упомянутых спецификациях сказано, что световой поток в 100 лм получен при потребляемой электрической мощности 1 Вт, чем подтверждается отношение в 100 лм/Вт, полученное при больших плотностях тока. Соответственно, найденная по формуле (1) оптическая мощность синего кристалла (400 мВт) дает представление о его КПД, которая получается равной 40%. Если брать в расчет объявленное производителем значение 131 лм/Вт, то получается, что внешний КПД структуры может достигать 60% при значении плотности тока, эквивалентном прямому току 350 мА через кристалл. Понятно, что такое значение КПД по приведенной достаточно грубой оценке едва достижимо для структуры AlInGaN, тем более в коммерческом исполнении. Это подтверждается и на рис. 3, где на рекомендованных Cree рабочих токах этот показатель, обозначенный там как отношение Port/Pel, очень далек от рассчитанных нами значений. Данное утверждение относится и к семейству светодиодов XR7090WHT, световая эффективность которых оценивается производителем как самая высокая при токе 700 мА через кристалл стандартного размера 0,9×0,9 мм (табл. 2).

**Таблица 1.** Оценка эффективности излучения и преобразования люминофора

Ток If, mA	Синий		Белый		Отношение K = Ф <sub>б</sub> /Ф <sub>с</sub>
	P <sub>b</sub> opt., Вт	Ф <sub>с</sub> , лм	P <sub>b</sub> opt., Вт	Ф <sub>б</sub> , лм	
50	0,023	1,894	0,019	5,983	3,16
100	0,050	4,191	0,040	12,873	3,07
200	0,090	7,539	0,071	22,664	3,01
300	0,122	10,237	0,095	30,461	2,98
350	0,137	11,500	0,108	34,450	3,00
400	0,152	12,763	0,119	38,258	3,00
500	0,178	14,944	0,138	44,241	2,96
600	0,201	16,839	0,151	48,230	2,86
700	0,219	18,369	0,161	51,494	2,80
800	0,239	20,092	0,165	52,944	2,64

**Таблица 2.** Энергетические характеристики различных типов белых светодиодов Cree

Ток If, mA	Мощность P, Вт	Cree	
		XR7090WHT лм/Вт (el)	XL7090WHT лм/Вт (el)
50	0,14	42,29	59,51
100	0,29	44,09	58,26
200	0,63	35,98	51,99
300	0,99	30,86	45,95
350	1,17	29,47	43,27
400	1,37	27,97	41,65
500	1,80	24,65	37,93
600	2,24	21,49	34,22
700	2,74	18,77	30,71
800	3,30	16,02	27,48

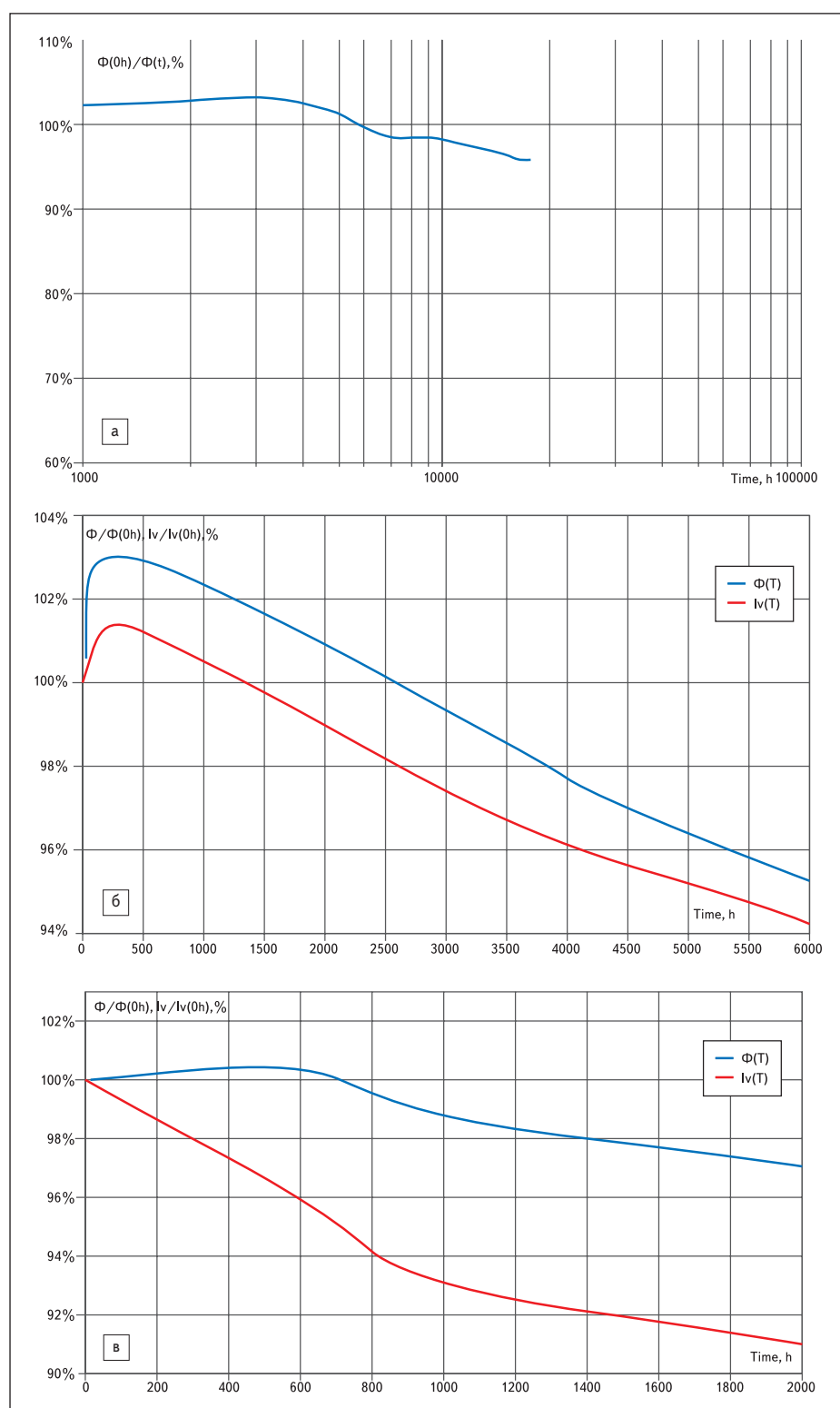
Однако, в то же время, не следует скидывать со счетов достижения специалистов фирмы Cree, позволившие им в короткий срок освоить выпуск светодиодов с реальной светоотдачей 50 лм/Вт, что также является неплохим показателем.

### Деграция параметров. Подтверждается временем

Задача достоверной оценки параметров светодиодов для построения на их основе каких-либо устройств значительно усложняется из-за необходимости учитывать возникающую в процессе наработки деграцию параметров. Разработчики ответственных устройств на светодиодах уже не могут удовлетвориться общепринятой цифрой, которую указывают практически все производители светодиодов, говоря, что наработка составляет не менее 100 000 часов с потерей до 30% силы света или светового потока и которая не подтверждается никакими расчетами. Совершенно очевидно, что на практике никто не проверял, насколько достоверна эта величина — хотя бы потому, что для этого потребуются не менее 11 лет (к тому же, степень деграции большинства параметров существенно зависит от многих факторов при реализации всей технологической цепочки производства [5], а также условий и режимов эксплуатации [7]). Оценка изменения параметров с помощью методов ускоренной деграции при наработке в форсированном режиме не является корректной из-за включения в таких режимах иных физических механизмов работы полупроводниковой структуры, которые не влияют на поведение характеристик в штатных условиях использования.

Однако в последнее время, хотя и достаточно редко, производители светодиодов стали помещать в спецификации зависимости значений некоторых параметров от времени наработки, чтобы разработчики смогли учесть данные изменения при проектировании своих изделий. Наиболее доступно получение такой информации для крупных фирм, заинтересованных в качестве своей продукции и имеющих достаточные средства и возможности для проведения экспериментов. Публикует такие данные, основанные на результатах собственных исследований, и фирма Cree. Тем не менее, как показала практика использования светодиодов в различных устройствах, наблюдаются расхождения между заявленными и реальными характеристиками. Это требует проведения силами пользователя дополнительных исследований для установления истинных значений параметров [2, 4, 5].

Поскольку основной физической характеристикой излучения этих светодиодов является световой поток, и значение этого параметра взято за основу формирования критериев сортировки по «бинам» или «ранкам», начать разговор следует именно с него. Однако здесь стоит напомнить, что световой по-

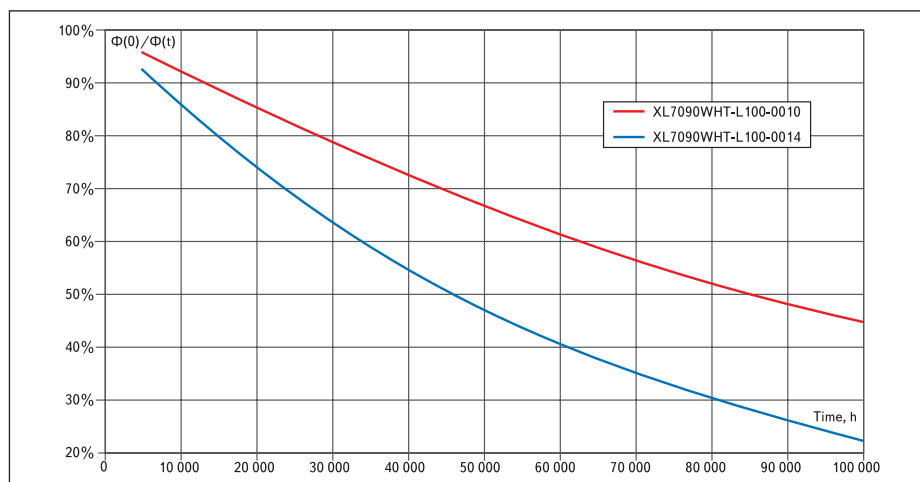


**Рис. 4.** Деграционные характеристики светового потока  $\Phi$  и осевой силы света  $I_v$  светодиодов Cree XLamp типа XL7090WHT различных «ранков», отсортированных по значению светового потока:

а — данные по деграции светового потока от Cree [1], б — полученные для «ранков» с эффективностью 30–33 лм/Вт, в — полученные для «ранков» с эффективностью 50–55 лм/Вт

ток представляет собой многомерный параметр, который может зависеть от многих других характеристик [2, 5], и, таким образом, уже они, эти характеристики, будут в итоге значительно влиять, например, на отношение лм/Вт или координаты цветности (относительную

цветовую температуру) излучения. Поэтому характеристики изменения светового потока удобнее рассматривать одновременно с динамикой поведения других, смежных параметров, таких как сила света (как показано на рис. 4, где приведены деграционные ха-



**Рис. 5.** Рассчитанные на основе полученных данных деградационные характеристики светового потока светодиодов Cree XLamp типа XL7090WHT различных «ранков», отсортированных по значению светового потока. Прогноз составлен до 100 000 часов наработки

характеристики светового потока и осевой силы света светодиодов).

Сначала остановимся на световом потоке, обозначенном на графике как  $\Phi(T)$ . Полученные зависимости светового потока от времени наработки показывают различное поведение характеристики при разных начальных его значениях. Исследования проводились при рекомендуемом производителем токе 350 мА через кристалл и теплоотводе площадью более 100 см<sup>2</sup>, что существенно больше требуемого. Таким образом температурный режим светодиода был однозначно соблюден. Как видно на рис. 4, большему значению светового потока (рис. 4б) (что соответствует большему отношению лм/Вт) свойственно большее падение его значения со временем. Однако и у светодиодов с эффективностью 30–33 лм/Вт (нижние «ранки») соответствия с данными Cree (рис. 4а) также не наблюдается. Показано, что окончание периода стабилизации параметров и переход значения светового потока через 100% к снижению по информации Cree наблюдается при 5000 часах наработки, в то время как у реальных образцов эта цифра колеблется от 800 до 2500 часов. Но самое важное, что после этого временного периода градиент деградации светового потока у реальных светодиодов не снижается, или в лучшем случае, несколько замедляется, достигнув уже неприемлемого значения для указанного времени наработки. Это означает, что уже приблизительно после месяца службы суммарный световой поток у светодиодов снизится на несколько процентов, а через полгода снижение может достичь 6–8%. Хотя диаграмма на рис. 4а говорит о другом. На первый взгляд, это не столь большие цифры, но если учесть рассуждения, приведенные ниже, то можно сделать вывод, что это отнюдь не утешительная статистика.

Несмотря на то, что максимально достоверные результаты исследования деградации могут быть получены лишь при наработке в те-

чение реального времени, столь продолжительную эксплуатацию (10–12 лет) реализовать затруднительно. Опыт исследований в этой сфере позволил разработать методики оценки параметров без проведения таких длительных наработок и операций искусственного старения. Здесь применимы зависимости, использующие физические основы работы полупроводниковой структуры, и расчеты и моделирование с использованием данных по наработке на отказ в течение относительно небольшого времени работы светодиодов. Наиболее полное представление о прогнозе поведения светового потока со временем наработки описываемых светодиодов может дать рис. 5. Данные характеристики были получены на основе измерений светового потока светодиодов в течение не менее 8000 часов наработки. В основу расчета легло известное соотношение (2) для деградации энергии излучения, связывающее несколько важных факторов, которые являются доминирующими в процессе деградации. Переход от выходной оптической мощности к световому потоку был осуществлен с использованием полученных данных об изменении спектрального распределения излучения со временем.

В самом простом случае световой поток имеет экспоненциальную зависимость от плотности тока через структуру. Зависимость (2) определяет процессы, действующие после достижения стабилизации параметров излучения светодиодов

$$\Phi(t) = \Phi(0) \cdot \exp[-(J \times \alpha \times t)]. \quad (2)$$

Здесь  $J$  — плотность тока, А/см<sup>2</sup>;  $\Phi(0)$  — начальный световой поток, лм;  $\alpha$  — фактор, определяющий скорость деградации для данного типа светодиодов, см<sup>2</sup>/А·ч;  $t$  — время наработки, ч.

Как видно из рис. 5, 4б и в, а также из расчетов с применением соотношения (2), различные «ранки» светодиодов, отсортирован-

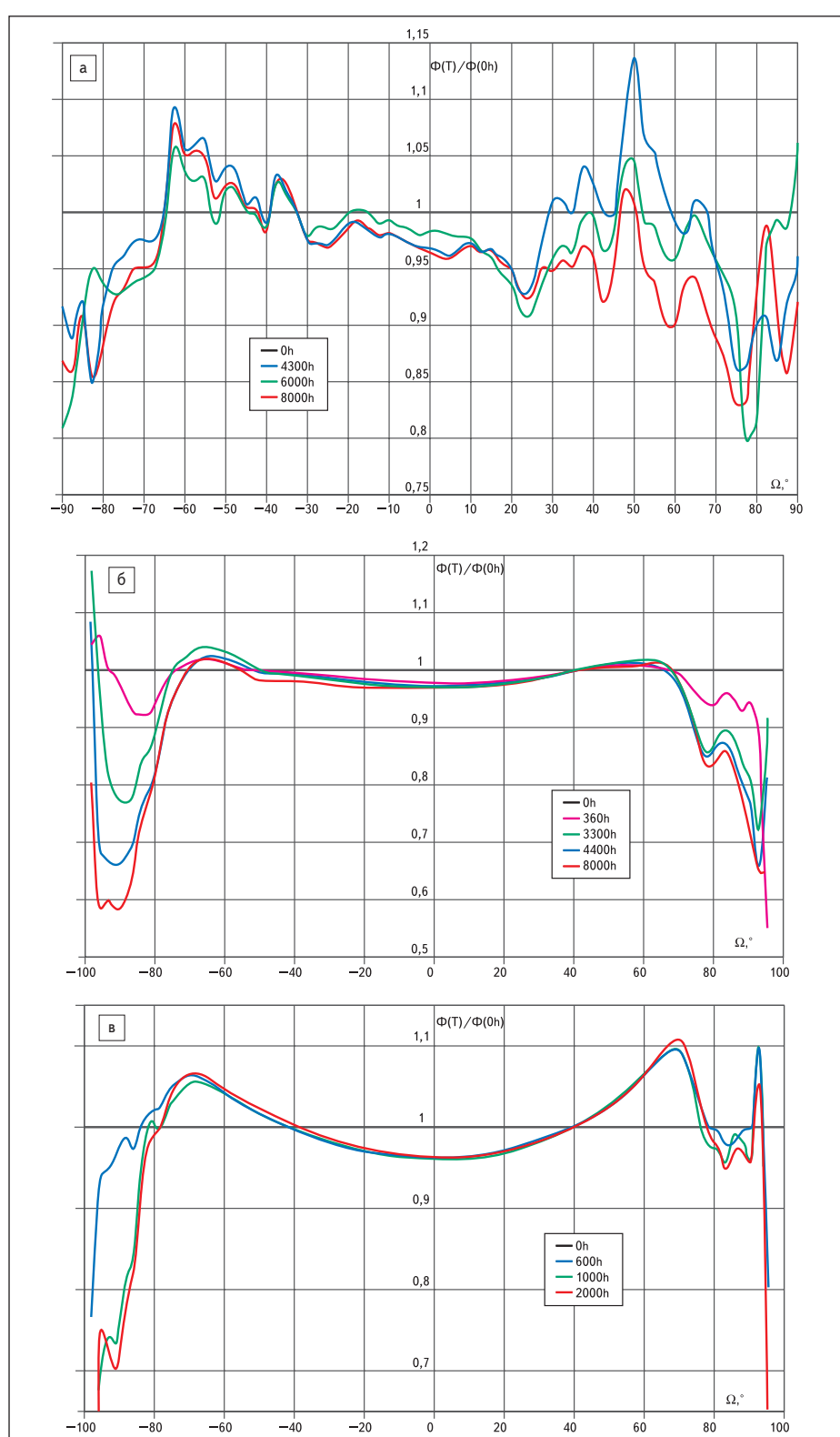
ные по значению начального светового потока, уже по достижении 10–12 тыс. часов наработки (1,5 года) недосчитываются 10–12% суммарного светового потока. А при приближении ко времени максимальной наработки, отмеченному производителем, потеря составляет уже от 55 до 75%. Совершенно очевидно, что мало кто из разработчиков будет закладывать такой ресурс работы своих устройств, поэтому настолько деградировать светодиоды просто не успеют, но здесь, скорее, речь идет о справедливости указанных в спецификации значений, чем о практике применения.

В чем причины такого поведения характеристик? Обратимся ко вторым кривым на графиках рис. 4 — деградационным характеристикам осевой силы света. Как можно заметить, деградация силы света не только отличается от деградации светового потока величиной, но может иметь и другой закон изменения, наклон или градиент. Степень такого отличия от поведения характеристики светового потока тем больше, чем больше градиент падения суммарного светового потока (как на рис. 4в). Для монохромных светодиодов причина такого эффекта подробно описана автором ранее [4]. Однако стоит напомнить, что изменение осевой силы света не учитывает изменения значений силы света по всей диаграмме пространственного распределения, поэтому именно световой поток отражает истинность деградационных явлений энергетической характеристики излучения. Таким образом, разница градиентов изменения может быть следствием только одного явления (помимо просто неравномерного изменения значения по диаграмме распределения) — перераспределения светового потока по объему диаграммы направленности излучения, возможно, даже без изменения значения суммарного потока. Практика исследования деградационных явлений показала, что наибольшей деградации светового потока будет соответствовать наибольшая степень его перераспределения по объему диаграммы распределения. Именно это мы и можем наблюдать на рис. 4. Для более наглядного представления этого эффекта применительно к описываемой группе белых светодиодов на основе люминофора удобнее рассматривать диаграммы относительного распределения светового потока, приведенные на рис. 6.

Здесь можно наблюдать тенденцию перераспределения светового потока, которая прослеживается у всех типов светодиодов, на основе излучающих кристаллов Cree типа S460XB900-S9000A. Как отмечалось автором [4], большая площадь поверхности такого кристалла неизбежно приведет к неравномерному распределению плотности светового потока по диаграмме излучения, что еще больше проявляется при деградации. Поэтому динамика перераспределения и деградации в процессе наработки будет иметь достаточно сложный характер, показанный на рис. 6а в диапазоне времени наблюдения

0–8000 ч (1 год), однако их характер в целом вполне различим. Хорошо заметно, что в диапазоне углов излучения  $\pm 40^\circ$  (центральная область) имеет место уменьшение значения потока относительно начала наработки (0 ч), в то время как в районе  $\pm 50\text{--}70^\circ$  наблюдается его значительное увеличение, хотя и в меньшем диапазоне углов. На первый взгляд, такие метаморфозы явно указывают на уменьшение суммарного светового потока из-за существенного его провала в центре характеристики, однако применение прецизионных измерений и расчетов светового потока в различных областях диаграммы с высокой точностью позволило установить, что указанный провал пропорционально компенсируется увеличением боковых составляющих диаграммы. Поэтому процесс деградации энергетических параметров излучения может быть вполне описан характером перераспределения светового потока, а изменение численного значения суммарного потока связано с различной скоростью и степенью этого перераспределения в отдельных областях диаграммы пространственного распределения. Поэтому в начале наработки, несмотря на то, что мы наблюдаем рост значения суммарного светового потока (рис. 4), на рис. 6 видно, что его плотность просто перераспределена, и таким образом, если в центре имеется уменьшение, то, соответственно, рост доли потока в средней части оказывается большим по эффективности, и он не просто компенсирует провал, а даже увеличивает суммарный поток. Кроме того, такой эффект обусловлен еще и тем, что доля потока в удаленных от центра частях диаграммы оказывается более весомой не только из-за увеличения амплитудного значения светового потока в них, но и из-за существенно большего значения объемного интеграла на больших углах диаграммы

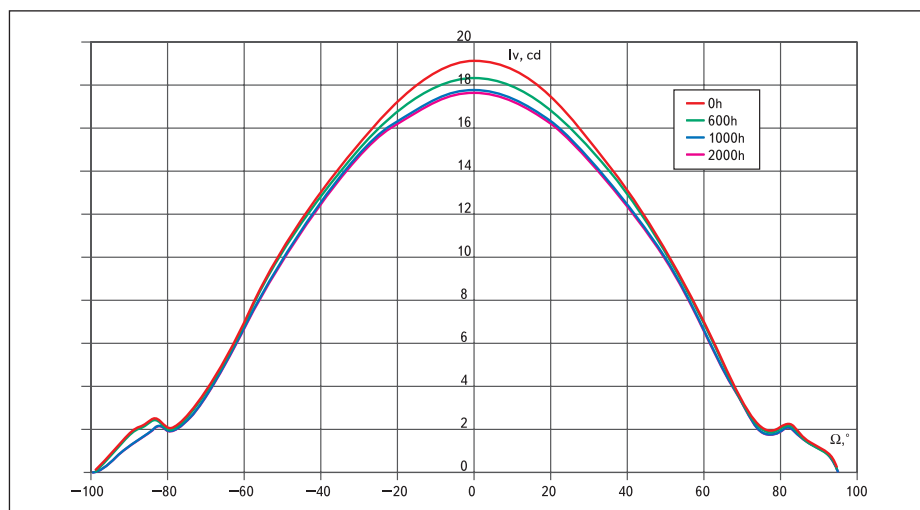
В случае с применением люминофора в белых светодиодах задача достоверного ответа как на причины деградации, так и на правильную оценку параметров светодиодов для разработчиков, оказывается более сложной и более простой одновременно. С одной стороны, находящийся поверх кристалла люминофор значительно сглаживает все процессы перераспределения, с другой — в такой конструкции начинают проявляться другие эффекты, свойственные только излучению широкого спектра, близкого к белому. Но об этом будет сказано в следующем параграфе. А если продолжить рассмотрение диаграмм на рис. 6б, в, то можно увидеть, что характер относительного перераспределения светового потока белых светодиодов с различными отношениями эффективности излучения лм/Вт в «сглаженном» виде полностью соответствует диаграмме исходного синего на рис. 6а. Однако и здесь видно, что наиболее резкие и большие по амплитуде изменения свойственны светодиодам с наибольшими показателями эффективности. Более известный [2]



**Рис. 6.** Характеристики относительного распределения светового потока Cree XLamp при различном времени наработки: а — исходного синего, как основы для белого типа XL7090ROY-L100 и XL7090WHT различных «рангов», отсортированных по значению светового потока: б — для «рангов» с эффективностью 30–33 лм/Вт, в — для «рангов» с эффективностью 50–55 лм/Вт

вид описанных деградационных явлений может быть изображен семейством индикатрис исследуемых светодиодов, измеренных в различные периоды наработки (рис. 7). Эти данные, показанные в качестве примера, могут быть полезны специалистам-светотехникам

для расчетов параметров светильников на основе этих светодиодов. На практике перераспределение светового потока источника излучения может существенно повысить габаритную яркость светильника и коэффициент ослепленности системы светильников



**Рис. 7.** Абсолютные диаграммы пространственного распределения силы света светодиодов Cree XLamp типа XL7090WHT при различном времени наработки

на основе светодиодов, а также изменить угловое распределение. Последнее наиболее заметно при применении оптики, которая значительно усиливает все описанные эффекты. Учет этих параметров особенно важен при проектировании аварийного или основного освещения помещений с жесткими и наиболее ответственными условиями эксплуатации (подводные лодки, шахты, бортовое освещение). К сказанному хотелось бы добавить, что подобное перераспределение светового потока свойственно не только полупроводниковым излучателям, но и другим источникам света.

### Все оттенки белого по Cree

Для полноты представления параметров светодиодов линейки Cree XLamp нельзя не коснуться цветовых характеристик. На этот счет у Cree также имеется большой раздел в спецификации, где указаны «ранки» светодиодов, координаты цветности которых попадают в соответствующие части области цветности общей зоны белого по рекомендациям МКО [6]. Попробуем разобраться в предложенной системе и параметрах реальных светодиодов. Помимо обозначенных в предыдущих параграфах тонкостей разработки и производства белых светодиодов на основе люминофора существует проблема равномерности цветовых параметров излучения по диаграмме направленности. Это, прежде всего, связано с особенностями технологии нанесения и осаждения люминофора на кристалл при производстве. Совершенно очевидно, что чем больше площадь кристалла, тем труднее нанести слой люминофора, пропорциональный плотности излучения в каждой точке. К тому же, технология нанесения люминофора должна учитывать большое количество факторов и условий, поскольку в силу вступают еще и эффекты перераспределения этой плотности в процессе наработки.

Совершенствование методик и средств исследования характеристик излучения полупроводниковых источников позволяет сделать оптимальной эту технологию. Рассмотрим, как над этим вопросом поработали специалисты фирмы Cree.

На рис. 8 показаны задекларированные в спецификации для светодиодов Cree XLamp области цветности и соответствующие им цветовые параметры исследуемых светодиодов. Графики построены таким образом, что, фактически, на них отражены диаграммы углового распределения координат цветности, и их положение отражено относительно регламентируемых производителем зон. Более того, для каждого из трех типов приведенных светодиодов даны 2 зависимости: с начальным значением и после некоторой (указанной на графике) наработки. Это сделано для того, чтобы можно было оценить динамику и степень изменения цветовых характеристик.

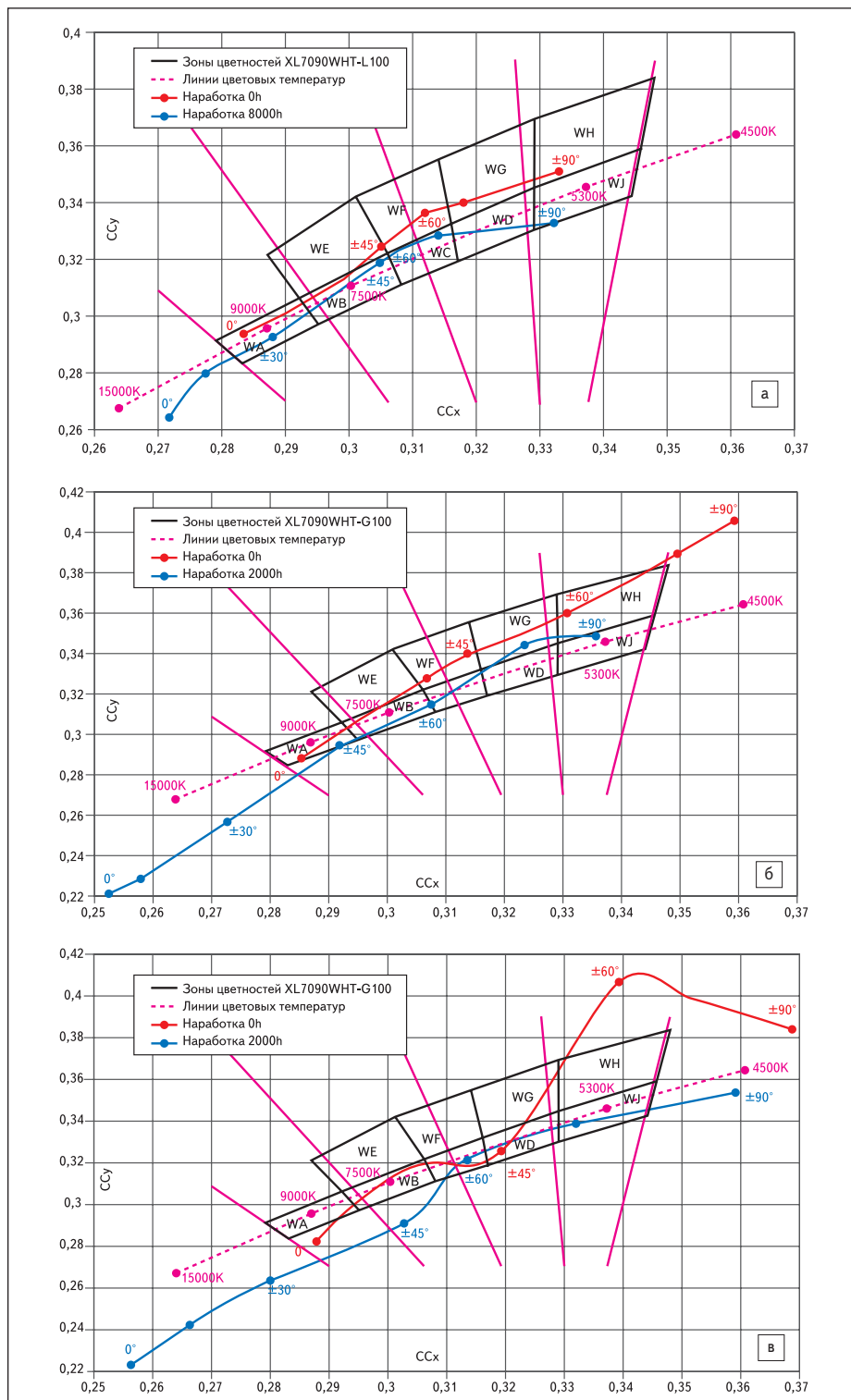
Из графиков на рис. 8 видно, что ни в начальный момент, ни после наработки не наблюдается соответствия цветовых параметров спецификации и реальных светодиодов. Однако односторонне рассматривать эти несоответствия некорректно. Дело в том, что различным зонам диаграммы направленности соответствуют не только различные координаты цветности, но и, как мы выяснили ранее, различные доли суммарного светового потока. Например, крайним точкам кривых ( $0^\circ \dots \pm 20^\circ$  или  $\pm 80^\circ \dots \pm 90^\circ$ ) будет соответствовать лишь небольшая доля потока — всего по 5–7%. Но при восприятии глазом под соответствующим углом цветовые различия будут заметны (рис. 8). Такой подход к оценке цветовых параметров справедлив лишь в одном случае: когда весь световой поток с набором цветовых оттенков собран в поле зрения  $1^\circ$  и занимает все поле зрения «стандартного наблюдателя МКО». Однако угловую характеристику излучения светодиодов нельзя рассматривать таким образом, по-

скольку, как известно, только по уровню 0,51v она составляет  $100^\circ$ .

Следует отметить, что в свете описанных зависимостей деградации и перераспределения светового потока можно достаточно точно описать причины появления столь высокого разброса координат цветности излучения белых светодиодов. Если сопоставить графики рис. 6б, в и 8б, в, то можно заметить, что на одних и тех же самых углах диаграммы (приблизительно  $30\text{--}70^\circ$ ), где происходит увеличение доли потока со временем наработки, отмечается максимальное изменение координат цветности. Это можно определить по изменению расстояния между точками  $\pm 45^\circ$  и  $\pm 60^\circ$ , которое выражается соответствующим изменением координат цветности излучения в этой области. Действительно, увеличение интенсивности исходного излучения в этой области повышает долю коротковолновой составляющей спектрального распределения и «подтягивает» координаты цветности этой области в сторону синего цвета на цветовом графике МКО. Поскольку изменения интенсивности излучения в разной степени происходят практически во всех областях диаграммы, вся характеристика углового распределения координат цветности смещается в зону высоких цветовых температур. Падение доли светового потока в самом центре диаграммы, тем не менее, не останавливает уход и этой области в том же направлении — прежде всего, в результате изменения спектрального состава излучения приконтактной центральной зоны исходного кристалла в коротковолновую сторону, а также уменьшения амплитудного значения потока этой области.

Так же как и ранее, в случае со световым потоком, показано, что наибольшему разбросу координат цветности светодиодов различных «ранков» по значению эффективности лм/Вт соответствуют приборы с высокими показателями эффективности. Очевидно, что это обусловлено именно перераспределением плотности потока. Это также подтверждается и сравнением графиков 6а и 8а. На них показаны зависимости для светодиодов с эффективностью 30–33 лм/Вт, где малая степень перераспределения определяет небольшой разброс цветовых параметров и стабильность их при наработке. Поскольку указанные деградационные эффекты проявляются за достаточно короткое время, несоответствие параметров будет отмечаться уже на первом месяце эксплуатации светодиода. Таким образом, полученные нежелательные изменения можно учесть при производстве светодиодов, внося коррективы в технологию распределения плотности осаждения люминофора. Судя по полученным данным, такая коррекция на Cree не производилась.

По представленным результатам исследований образцов можно сделать следующий вывод: получение высоких значений (до 50 лм/Вт) эффективности излучения в данном случае было достигнуто, в основ-



**Рис. 8.** Угловое распределение координат цветности светодиодов Cree XLamp в процессе наработки и их положение относительно установленных производителем зон цветности различных «ранков». а — светодиоды типа XL7090WHT-L100 «ранк» WF, б — светодиоды типа XL7090WHT-G100 «ранк» WD с эффективностью 30–33 лм/Вт, в — светодиоды типа XL7090WHT-G100 «ранк» WD с эффективностью 50–55 лм/Вт. Значения углов обозначены на кривых точками, положительные и отрицательные углы совмещены

ном, за счет увеличения доли составляющих светового потока от исходного синего кристалла (это определило такой большой диапазон изменения координат цветности и такое поведение деградационных характеристик), а не за счет применения кристаллов большей мощности с нанесением люминофорного по-

крытия по определенным правилам. Данное утверждение еще раз указывает на сомнения, высказанные в начале статьи, по поводу получения световой эффективности более 100 лм/Вт вообще, а также, с надлежащими цветовыми характеристиками, с любой эффективностью.

В современных системах освещения и подсветки светодиоды применяются все чаще, и ни у кого не вызывает сомнения успешное будущее этого процесса. Кроме большой коммерческой перспективы, у этого прогрессивного начинания есть сугубо техническая сторона, которая на данном этапе его развития играет первую и самую важную роль. Чем компетентнее окажутся разработчики полупроводниковых структур, тем качественнее и надежнее окажется производимый ими продукт. Чем лучше и яснее будут поняты проблемы и особенности твердотельных источников света инженерами, которые уже применяют светодиоды там, где до самого последнего времени это было трудно и представить, тем быстрее и увереннее мы сможем сказать, что достигли поставленной цели и с коммерческой стороны. Поэтому единственным правильным путем развития общего большого дела будет решение возникающих проблем с обеих сторон.

Недавно начавшееся использование на российском рынке светодиодов производства Cree открыло большие перспективы для их производителей с одной стороны и возможности использования для отечественных разработчиков с другой. Опыт разработчиков и качество продукции Cree известны и признаны во всем мире. Хотелось бы оценить его по достоинству и на 1/6 части суши, где появление извне новаций в области твердотельных источников излучения можно расценивать, как возврат к их истинным корням. Потому как родившись в России и будучи подростком (полупроводниковая светотехника популярна уже не менее 15 лет), этот ребенок, к сожалению, получает практически исключительно только заграничное воспитание. Некоторый опыт родного языка ему не помешает.

### Литература

1. [www.Cree.com](http://www.Cree.com)
2. Никифоров С. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. 2005. № 5.
3. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Сушков В. П., Шишов А. В. Особенности конструирования мощных белых светодиодов // Светодиоды и лазеры. 2003. №№ 1–2.
4. Никифоров С. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
5. Никифоров С. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
6. Технический доклад МКО «Измерения СИД». (Technical report “Measurements of LED’s” CIE127-1997 [ISBN 3 900 734 84 4]).
7. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. 2005. № 9. 2006. № 1.