

Сергей Никифоров, к. т. н. | sergnik71@mail.ru

Если бы молодость знала, если бы старость могла

Статья посвящена промежуточным итогам продолжающегося в течение 5 лет эксперимента по изучению деградационных явлений в полупроводниковых излучающих кристаллах и светодиодах на основе AlInGaN. Представлены результаты исследований изменения характеристик светодиодов синего цвета свечения с указанными кристаллами, а также белых с применением люминофора с наработкой до 40 000 ч. Исследования проводятся в лаборатории «Л.И.С.Т.» с использованием собственных методик измерений и прогноза потенциальной степени изменения параметров излучающих структур на сертифицированном фотометрическом и спектрометрическом оборудовании.

Молодо — зелено, а старо — не так уж и гнило

Параметры светодиодов в последнее время растут чуть ли не в геометрической прогрессии. Если несколько лет назад добавлялось в год всего по 10–15 лм светового потока к прежним значениям, то теперь, судя по спецификациям, за то же время можно прибавить и все 40. Некогда революционная линейка светодиодов Cree XLamp 7090 WHT, имеющая световую эффективность 30–50 лм/Вт и наиболее откровенно показавшая миру, что светодиоды могут быть не только индикаторными, но и претендуют на применение в освещении, одна из первых приняла на себя все тяготы исследований и разносторонних испытаний на «прочность» и на соответствие этому громкому заявлению. Вполне естественно, что этот продукт стал еще и показателем качества последующих семейств светодиодов Cree, являясь самым исследованным и проверенным временем. Теперь нельзя утверждать, что изменения параметров, могущие в той или иной степени произойти со временем наработки приборов, заявлены или спрогнозированы виртуально: это уже проверено на практике, в режиме

реального времени, и может служить подтверждением или опровержением прежних прогнозов. Если говорить конкретнее, то срок реальной наработки образцов тех первых партий светодиодов насчитывает уже 30 000–50 000 ч, что соответствует минимальному периоду гарантийной эксплуатации, декларировавшемуся производителем. Совершенно понятно, что исследуемые типы светодиодов в настоящее время устарели по всем позициям, а полученные результаты вряд ли могут быть использованы современными разработчиками или поставщиками. Однако данное исследование очень актуально как со стороны изучения самой методики проведения подобных экспериментов, все больше использующейся на производстве, так и со стороны совершенствования знаний о технологии производства светодиодов и излучающих кристаллов. Настоящая работа продолжает описание эксперимента по деградационности, опубликованного в [1].

Старые песни о главном

Традиционно для такого исследования образцы подвергались непрерывной наработке

в течение всего времени с перерывом лишь на период измерений характеристик (несколько часов). Основные результаты по первому этапу наработки (до 6000 ч) были представлены в работе [1], далее оставалось лишь измерять комплексы параметров с периодичностью 6–9 месяцев — с тем, чтобы заметить могущие возникнуть катастрофические изменения характеристик. Таким образом, были проверены и прогнозы изменения светового потока, сделанные 5 лет назад на то время, которое в настоящий момент уже достигнуто реальной наработкой. По полученным данным также можно сделать вывод о доли изменения светового потока, вносимой люминофором и самим излучающим кристаллом: исследования светодиодов серии XLamp 7090 были продолжены и для XL 7090 ROY и XL 7090 BLU, основу которых составляют те же излучающие кристаллы, что и применяемые в XLamp 7090 WHT (рис. 1).

Результаты исследования поведения основных параметров представлены в таблице 1.

Несмотря на невысокую (глядя с современных позиций) эффективность одних из первых в мире коммерческих типов мощных светодиодов для освещения, прежде всего следует обратить внимание на близость значений деградационности светового потока не только у светодиодов различных рангов (по потоку), но и у приборов с кристаллами синего цвета излучения, которые применялись в белых в комплекте с люминофором.

Это свидетельствует о малой доле деградационности излучательных свойств люминофора относительно всей оптоэлектронной системы

Таблица 1. Результаты измерений основных параметров светодиодов в течение наработки до 40 000 ч

Тип светодиода	XL 7090 BLU-L100-0001			XL 7090 WHT-L100-0010 (низкий ранг)			XL 7090 WHT-G100-WD-N (высокий ранг)		
	до наработки	40 000 ч	изменение	до наработки	30 000 ч	изменение	до наработки	30 000 ч	изменение
Длина волны (доминирующая), нм	437,07	471,077	-1,99	—	—	—	455,6	456,144	0,544
Корректирующая цветовая температура, К	—	—	—	9541,8	26219,4	16677,6	9587,8	—	—
Полуширина спектра, нм	26,43	22,5	-3,93	26,5	27	0,5	24,5	24,5	0
Мощность излучения, Вт	0,134	0,127	-0,007	—	—	—	—	—	—
Световой поток, лм	11,21	9,71	-13,42%	34,46	27,59	-19,95%	50,12	43,08	-14,04%
Сила света (max), кд	4,6	4,38	-4,71%	12,96	11,01	-15,04%	19,15	17,02	-11,11%
Плотность тока, А/см ²	35	35	—	35	35	—	35	35	—
Потребляемый ток, А	0,35	0,35	—	0,35	0,35	—	0,35	0,35	—
Прямое напряжение, В	3,31	3,25	-0,06	3,33	3,29	-0,04	3,309	3,270	-0,039
Потребляемая мощность, Вт	1,159	1,138	-0,021	1,166	1,152	-0,014	1,158	1,145	-0,013
Световая эффективность, лм/Вт	9,68	8,54	-11,82%	29,57	23,96	-18,98%	43,27	37,64	-13,01%

светодиода. Однако не принимать ее во внимание было бы неправильно, хотя бы по причине существенного увеличения неравномерности колориметрических характеристик по углу излучения со временем наработки. Данное обстоятельство хорошо проиллюстрировано на рис. 4а и в графе «Коррелированная цветовая температура» в таблице 1. Можно заметить, насколько изменяется цветовая температура, значение которой для XL 7090 WHT-G100-WD-N к указанному времени наработки вообще перестало иметь смысл из-за значительного увеличения доли синего излучения в спектре (рис. 4б), превратившего светодиод в центральной части диаграммы пространственного распределения силы света из белого в практически синий. Ситуация у аналога с меньшей эффективностью, но с одинаковой начальной цветовой температурой, несколько лучше, но также неприемлема.

К этому можно добавить лишь то, что в более поздних типах светодиодов, один из которых будет рассмотрен в следующем параграфе, этот недостаток практически устранен. Следует отметить, что рис. 4а является «продолжением» рис. 8а из [1] по времени испытания образцов, параметры которых показаны на нем теперь также и по истечении 30 000 ч. наработки. Рис. 2, 3, 5 являются «доработкой» соответствующих иллюстраций, помещенных в [1], на которых

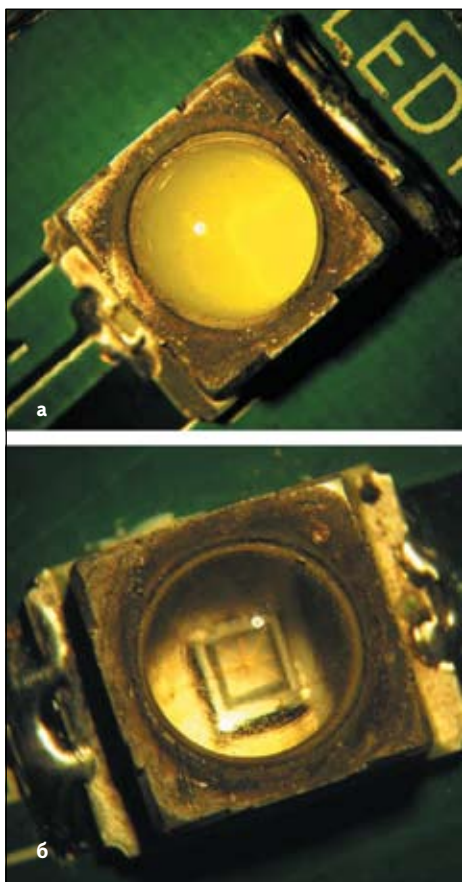


Рис. 1. Внешний вид образцов светодиодов XLamp 7090 с наработкой:
 а) XLamp 7090 WHT — 30 000 ч,
 б) XL 7090 BLU — 40 000 ч

«достроены» зависимости, измеренные в точке наработки 30 000–40 000 ч. И если сопоставить данные рис. 4а и результаты измерений измененной максимальной длины волны (всего до 2 нм), то вывод о присутствии деградации излучательных свойств люминофора будет более аргументированным. Однако сведения из таблицы 1 также указывают на существенное перераспределение светового потока синего светодиода (максимальная сила света изменилась на гораздо меньшее значение, чем поток), что значительно отличается от данных по белым светодиодам. Вероятно, наличие люминофора нивелирует процесс перераспределения светового потока кристалла, плотность которого повышается со временем у геометрического центра последнего, где наибольшая напряжен-

ность приложенного электрического поля и, соответственно, плотность тока.

Это утверждение иллюстрирует рис. 2, на котором изображены относительные диаграммы распределения светового потока по углу излучения на различной стадии наработки, где видна одинаковая тенденция увеличения его плотности в центре диаграмм. Однако при такой длительной наработке однозначное предположение о причине относительного увеличения плотности потока в связи с изменением условий растекания приложенного потенциала по поверхности кристалла будет некорректным из-за соответствующей большей деградации излучательной рекомбинации участков с большей же плотностью тока. Последний процесс хорошо просматривается

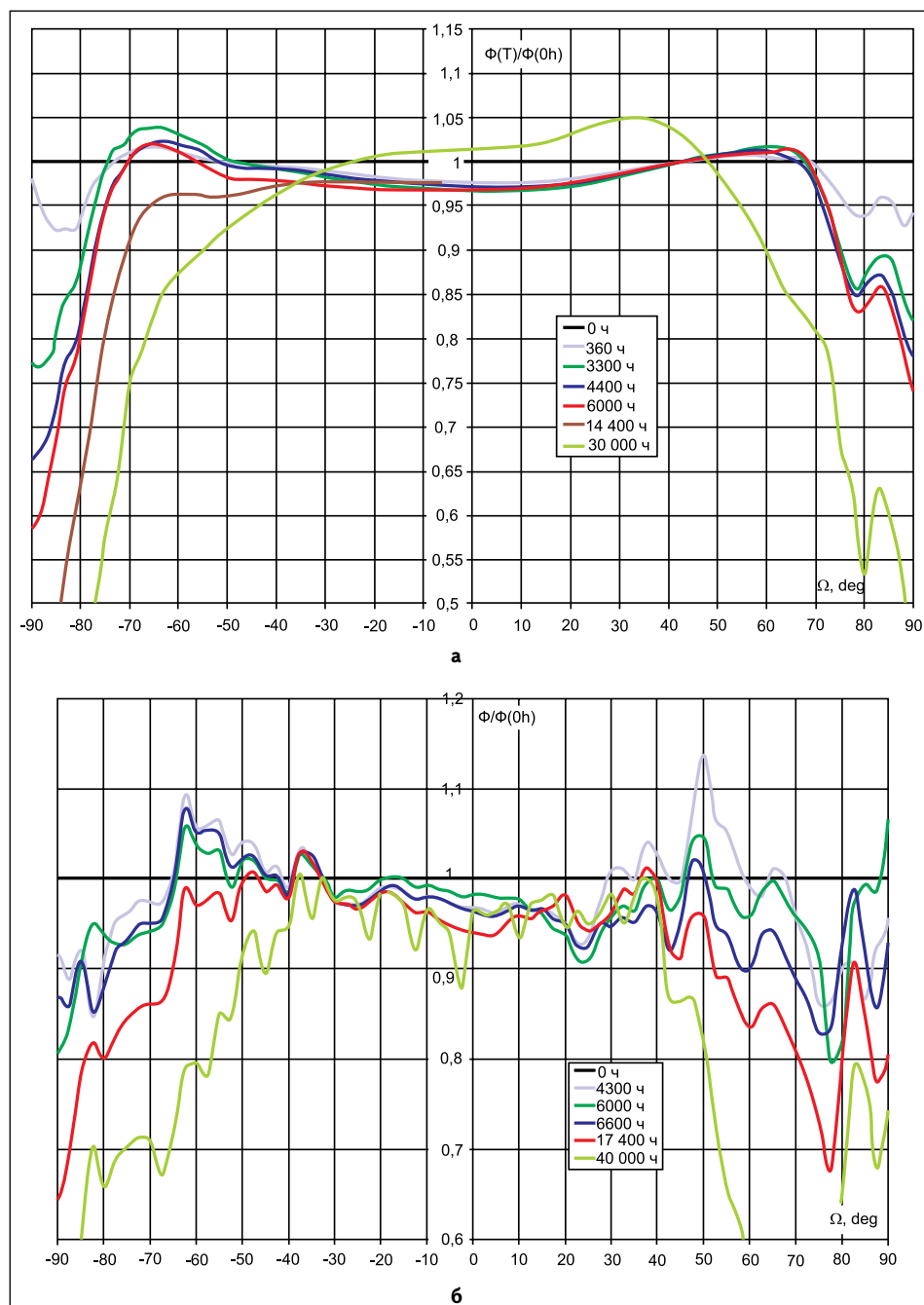


Рис. 2. Диаграммы, показывающие перераспределение светового потока в зависимости от времени наработки у светодиодов: а) XLamp 7090 WHT и б) XL 7090 BLU.

на графиках рис. 3, где можно заметить, что в определенный момент (как для белого светодиода на рис. 3а, так и для синего, рис. 3б), соответствующий точке наработки примерно в 7 500 ч, довольно резко изменился градиент падения значений светового потока и силы света, «поменяв» местами деградационные характеристики этих параметров. Световой поток стал уменьшаться гораздо интенсивнее максимальной силы света как следствие увеличивающейся скорости перераспределения, а не уменьшения его интегрального значения. В каких-то случаях решающую роль в характеристике освещенности от таких светодиодов будет играть именно сила света (например, в случае узконаправленного светового прибора), а значит, корректнее будет пользоваться деградационной характеристикой красного цвета на рис. 3.

Такое положение дел является доминирующей причиной увеличения коррелированной цветовой температуры белых светодиодов с наработкой именно в центре диаграммы, как показано на рис. 4.

Как видно на рис. 4а, диапазон изменения координат цветности (коррелированных цветных температур) в зависимости от угла об-

зора светодиода, представляющий из себя «протяженность» линии, соединяющей точки этих углов на диаграмме, со временем наработки практически не изменился. Однако он закономерно «сместился» в сторону больших температур, и к 30 000 ч. эксплуатации «попадание» в первоначально присвоенный ранг стало возможно только при углах обзора >60°. Совершенно понятно, что все что угодно, но только не это обстоятельство было задекларировано при сортировке этих образцов производителем почти 5 лет назад. Рис. 4б иллюстрирует то же самое, только с точки зрения изменения спектрального состава излучения, что несколько нагляднее, а в таблице 1 соответствующие параметры указаны в первых трех строках для каждого типа светодиода.

Деградационные характеристики светового потока, достоверность которых — предмет самых больших споров при появлении новых продуктов на рынке, в различных вариантах представлены на рис. 5. Диаграмма (рис. 5а) показывает, как влияет время, в течение которого происходит анализ данных, на достоверность прогноза деградационной характеристики в сравнении с реально полученными значениями степени деградации. Можно за-

метить, что в точке 30 000 ч, полученной теперь уже экспериментально, значение светового потока в соответствии с прогнозом по 6 000 ч отличается менее чем на 2%. Для примененной методики прогнозирования таких характеристик это достаточно высокая точность. Достоверность приведенной расчетной кривой (красная линия на рис. 5а), сделанной 5 лет назад, можно проверить в публикации [1] на рис. 5. Предполагается, что достоверность прогноза значения светового потока этих светодиодов на 50 000 ч (декларируемый гарантийный ресурс) составит 3% от более точного расчета (по 30 000 ч) и не более 5% от реально полученных в то время значений. Также из результатов представляемого исследования можно сделать вывод, что регламентируемые производителем 30% потери светового потока за 50 000 ч наработки — вполне реальная цифра, что и просматривается на рисунке 5а. Однако если упомянуть об изменении колориметрических характеристик, то, конечно, совокупное изменение параметров не может свидетельствовать о высоком качестве данных образцов светодиодов с системой синий кристалл-люминофор. Но в то же время, если дифференцировать деградацион-

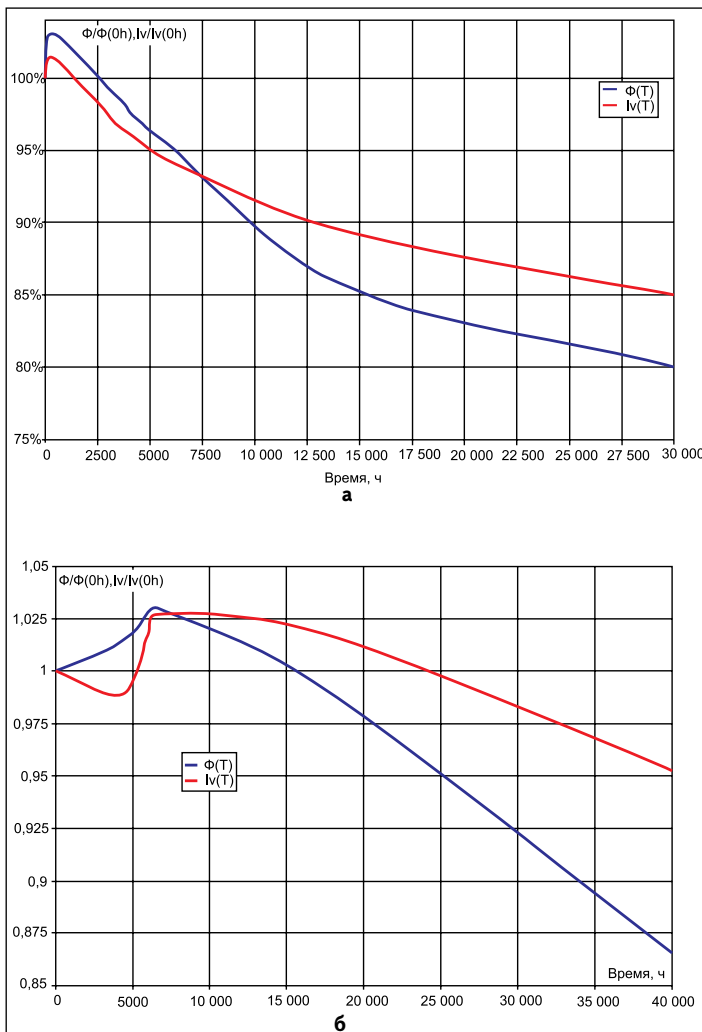


Рис. 3. Реальные деградационные характеристики светового потока и максимальной силы света светодиодов: а) XLamp 7090 WHT; б) XL 7090 BLU

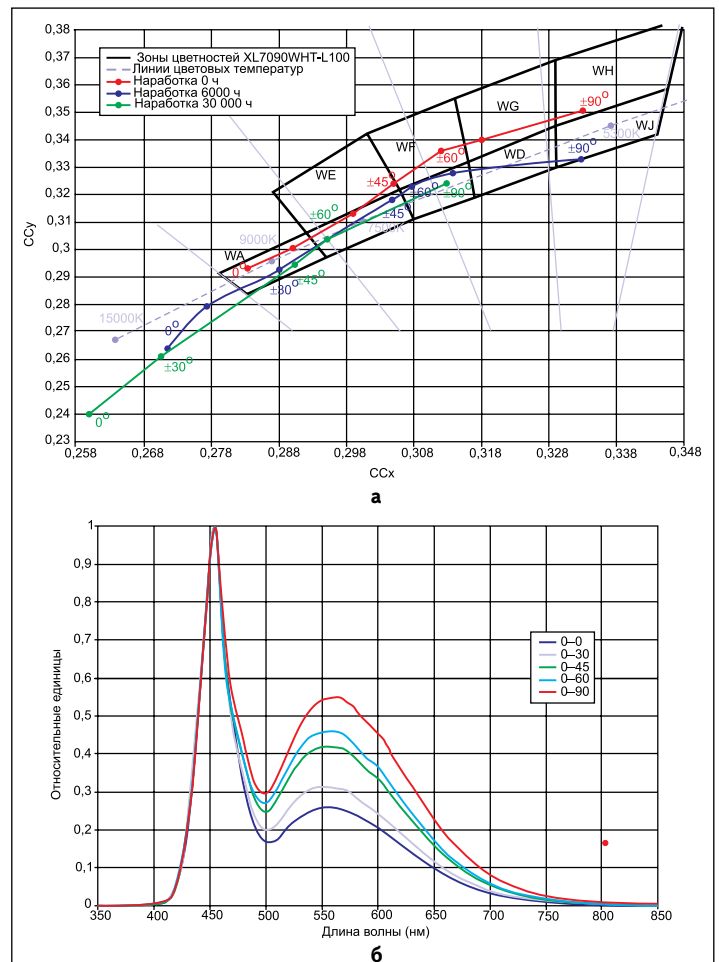
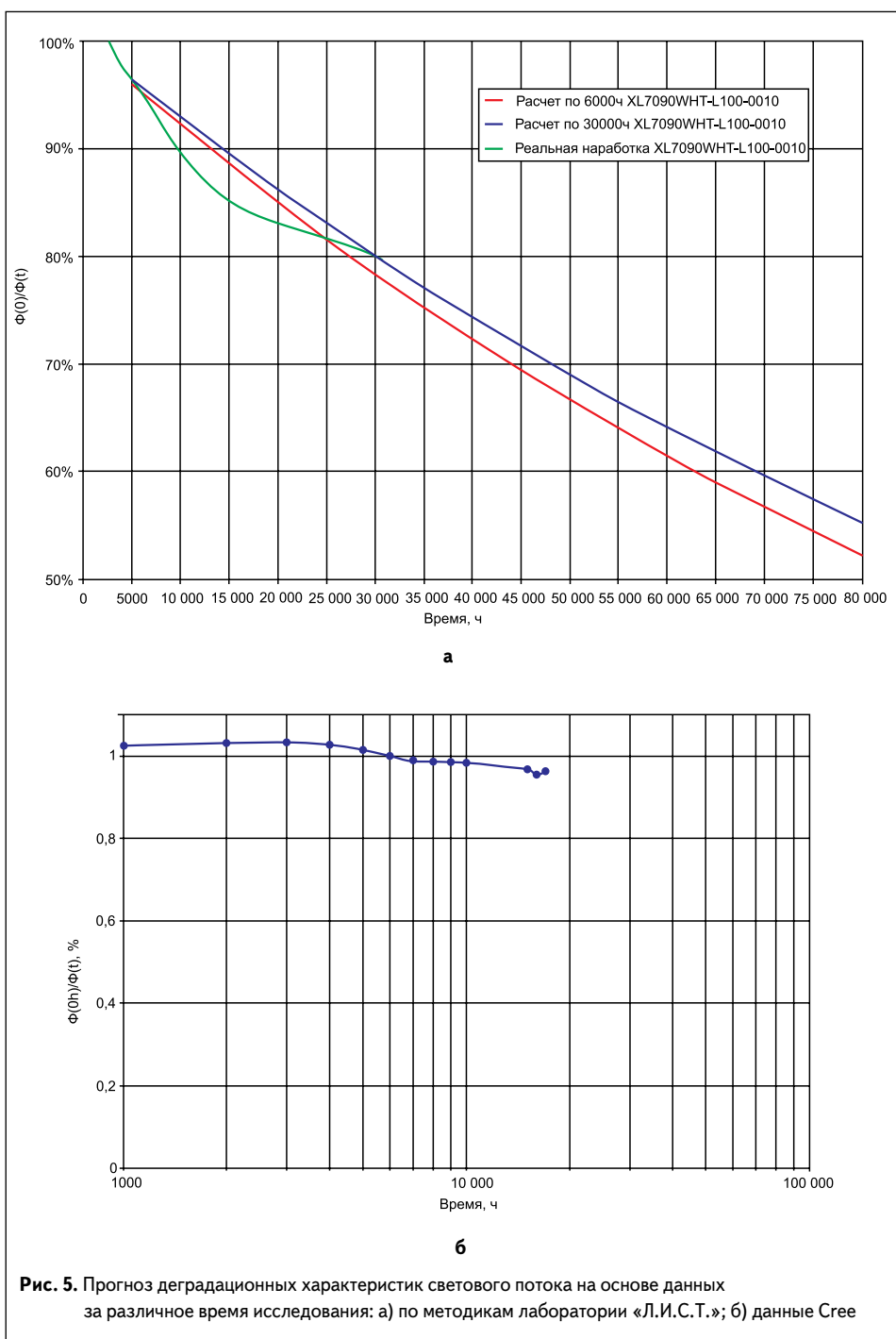


Рис. 4. Колориметрические характеристики светодиодов XL 7090 WHT-L100-0010 (низкий ранг), зависящие от угла обзора светодиода, и в процессе наработки: а) положение на цветовом графике МКО-31; б) спектры излучения в точках измерений углов обзора, соответствующие рис. 4а



ные характеристики излучающего кристалла и люминофора с кристаллом отдельно, то можно сказать, что именно сама гетероструктура на основе InGaN в данном примере показала себя с наилучшей стороны, и как раз физические процессы, происходящие в ней при наработке, говорят о приемлемом качестве ее производства (таблица 1, рис. 2б). Имеется этому выводу и подтверждение, показанное на рисунке 5б. Это деградационная характеристика светового потока, представленная фирмой Cree на эту линейку светодиодов, и полученная при подобных исследованиях самим производителем. Можно заметить, что на 18 000–20 000 ч наработки на ней фигурируют всего 2–3% потери потока, в то время как по данным эксперимента получается 16%, по расчету — 12%. Полученные результаты сравнения, мягко говоря, не совсем стыкуются, и скорее всего — по одной простой причине: данные от Cree на рис. 5б представлены именно для светодиодов с синим цветом свечения, то есть без люминофора. Тогда это сходится и с нашим экспериментом, в котором на 18 000 ч наработки получены те самые 2% (рис. 3б). Однако более современные данные от производителей все же гораздо «честнее», и как прогнозы, так и реальные исследования выглядят гораздо «приземленнее».

Старая сказка на новый лад

В дополнение к описанному исследованию, где показаны параметры прежних типов светодиодов, полученные при больших сроках наработки, с точки зрения потребителя, производителя или поставщика существенно интереснее подобный анализ современных, актуальных сейчас типов приборов. Безусловно, таких сроков наработки у новинок не может быть, и тут пригодно к использованию лишь та методика прогноза, достоверность которой проверяется уже на протяжении многих лет, и применение ее в широком диапазоне типов светодиодов и излучающих кристаллов.

После презентации долгосрочных исследований их результаты удобно спроецировать на полученные данные для других типов приборов, а также от различных производителей. Ниже будут представлены два более современных варианта светодиодов, успевших, тем

Таблица 2. Результаты измерений основных параметров светодиодов Cree и OSRAM Semiconductors в течение наработки 12 000 ч

Тип светодиода	Cree XRE WHT-L1-0000-00901			OSRAM LUW W5AM-LXLY-6P7R		
	до наработки	12 000 ч	изменение	до наработки	12 000 ч	изменение
Параметр						
Корректирующая цветовая температура, К	6742,37	6777,22	34,85	9095,54	6657,47	-2438,07
Ширина спектра по уровню 0,1, нм	244	242,5	-1,5	241	257	16
Световой поток, лм	58,39	48,46	-17,01%	117,8	108,65	-7,77%
Сила света (max), кд	30,15	24,89	-17,45%	26,24	24,31	-7,36%
Плотность тока, А/см ²	35	35	-	35	35	-
Потребляемый ток, А	0,35	0,35	-	0,35	0,35	-
Прямое напряжение, В	2,994	2,979	-0,015	3,27	3,18	-0,09
Потребляемая мощность, Вт	1,048	1,043	-0,005	1,145	1,113	-0,032
Световая эффективность, лм/Вт	55,72	46,48	-16,59%	102,93	97,62	-5,16%

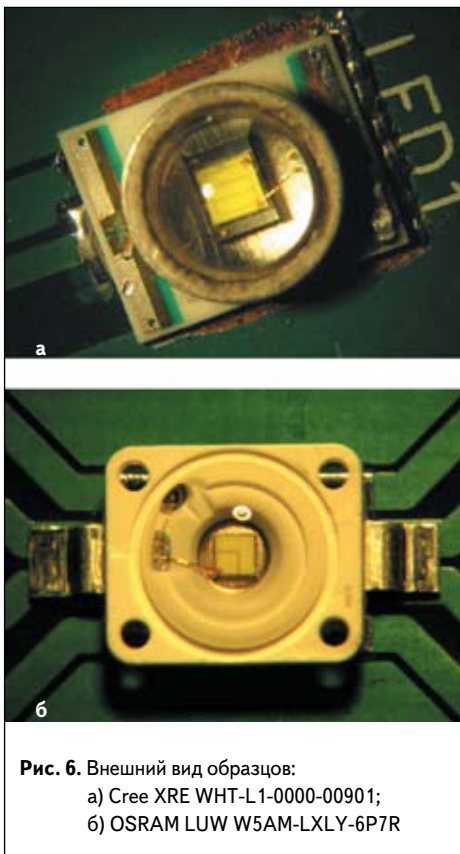


Рис. 6. Внешний вид образцов:
а) Cree XRE WHT-L1-0000-00901;
б) OSRAM LUW W5AM-LXLY-6P7R

не менее, отработать уже полтора года и дать «пищу» для размышлений об их качестве и потенциальном ресурсе параметров. Это Cree XRE WHT-L1 и популярный продукт от OSRAM Opto Semiconductors — Golden DRAGON LUW W5AM-LXLY. Следует отметить, что в данных светодиодах применены идентичные по конструкции излучающие кристаллы, выращенные на подложке SiC, а также со сходными способами нанесения люминофора, именно поэтому

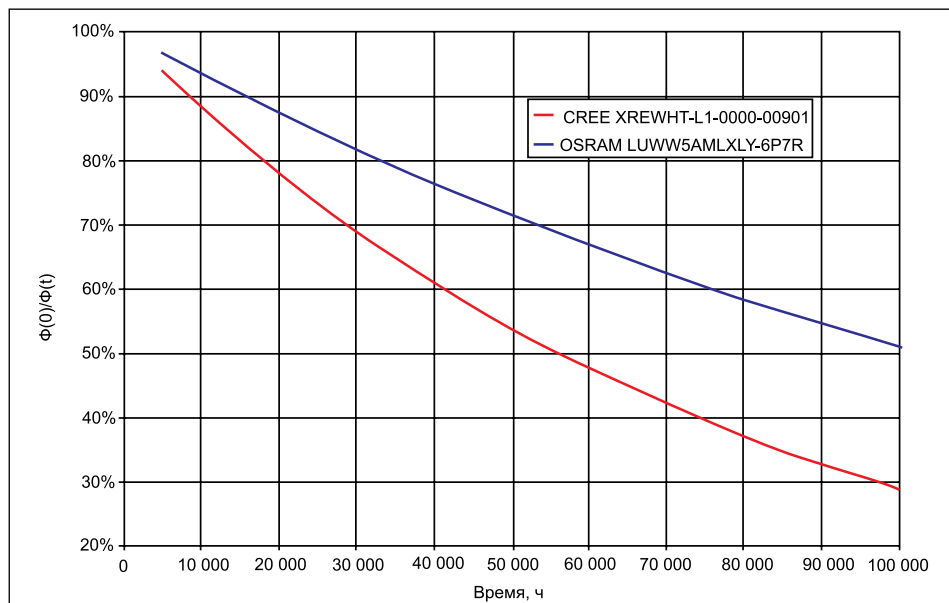


Рис. 7. Прогноз деградации светового потока светодиодов OSRAM LUW W5AM-LXLY-6P7R и Cree XRE WHT-L1-0000-00901

сравнение будет наиболее достоверным. Данные по измерениям характеристик в течение 12 000 ч наработки показаны в таблице 2, а внешний вид образцов — на рис. 6.

Особых комментариев к таблице 2 не требуется, все выражено в цифрах. Хотя эффективность светодиодов отличается почти вдвое, а, как говорилось, излучающие кристаллы по конструкции сходны, можно заметить, что тенденции изменения колориметрических характеристики совершенно разные. У образцов от Cree изменений за время наработки вообще не выявилось. Налицо положительные изменения в технологии нанесения люминофора. Но довольно высокая степень падения светового потока — не совсем оправданная плата за эту стабильность.

На рис. 7 представлен прогноз изменения светового потока образцов на основе данных за 12 000 ч. По предыдущему опыту таких предсказаний можно сделать вывод, что он в высокой степени достоверен. Однако наработка этих образцов, также как и описанных в начале статьи, продолжается, а значит, мы сможем впоследствии провести подобное сравнение с измерениями. ●

Литература

1. Никифоров С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp // «Компоненты и технологии». 2006. № 11.
2. www.cree.com