

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

# Повесть о «вечной» молодости светодиодов

**В статье приведены результаты исследований комплекса характеристик полупроводниковых излучающих кристаллов на основе InGaN, полученные при непрерывной наработке в течение 5–6 лет. Материал основан на долгосрочном эксперименте по изучению деградационных явлений в полупроводниковых излучающих гетероструктурах, проводимом лабораторией «Л.И.С.Т.». Статья может быть полезна разработчикам и потребителям светодиодов и устройств на их основе.**

## Это было недавно, это было давно

Одновременно, а если быть точнее, то несколько раньше рождения светодиодов как изделий на основе полупроводниковых излучающих структур, стартовал процесс исследований их времени жизни, или ресурса наработки. Поскольку жизнь им прочилась долгая, каждый из производителей кристаллов, а впоследствии и светодиодов на их основе, озадачился оценкой ресурса своей продукции, чтобы заполнить пустую графу с этим параметром в листке спецификации, информировав потребителя, и, прежде всего, ответить на этот вопрос самому себе. И если перед потребителем можно было слухавить, написав цифру в 100 000 ч наработки (все равно это невозможно проверить, да и никто из них в этом и не сомневался), то уж для себя нужна была только истина.

С приобретением опыта производства и использования светодиодов шестизначные цифры в информационных листках постепенно стали сокращаться как минимум на порядок, а производитель использовал смутное время изысканий для исследований поведения параметров своих, конкурентских и вообще всех, какие мог достать, изделий полупроводниковой светотехники. Таким образом уже лет 6–8 назад стали появляться отчеты крупных производителей излучающих структур о ресурсных характеристиках кристаллов и усовершенствованных рекомендациях по их применению

в светодиодах. Откровения таких именитых фирм, как Cree или Lumileds, что за обозначенные 100 000 ч наработки их светодиоды теряют до 30–40% светового потока, несколько удивляли публику: «Как же так, снова «Титаник»?», однако они быстро стали знаком хорошего тона, потому как честность всегда приветствуется. Совершенно понятно было только одно: вряд ли представленные зависимости могли быть реально получены в столь короткий срок, потому как 100 000 ч — это, ни много ни мало, почти 12 лет. Когда только успели, ведь светодиод выпущен несколько месяцев назад? Зато сколько творчества в трактовке характеристик прибавилось коммерсантам! Можно было указать начальные значения светового потока намного больше реальных, а потом все списать на деградацию и неумелое использование светодиодов необразованными потребителями. Тем более что кривые деградационных характеристик с каждым годом все более «выпрямлялись» в сторону уменьшения деградации, как будто со временем использовавшаяся копировальная техника теряла качество при перепечатке презентаций менеджеров друг у друга. В публикациях «стирались» написанные мелким шрифтом возле графиков изменения светового потока со временем оговорки вроде такой: «зависимость верна при температуре активной области кристалла +25 °С». И только лишь фирма Nichia одна из немногих декларировала, как казалось тогда остальным, непорядочно низкие значения эффективности светоот-

дачи белых или синих светодиодов относительно коллег по цеху, сообщая, однако, всего лишь о единицах процентов снижения потока во времени. Получалось в итоге наработки одинаково, но цифра в 139 лм с 1 Вт светодиода в 2007 г. у Cree выглядела куда заманчивее для покупателя. Вот и ездили по свету менеджеры-проповедники, растолковывая «темноте» про такие достижения. Однако с гордостью надо отметить, что некоторые светодиоды услышали русский язык гораздо раньше, чем этого ожидали региональные представители фирм по востоку. Зачастую лекции-проповеди о заграничном чуде заканчивались тем, что лектор узнавал о своей продукции от публики-«темноты» на неплохом английском гораздо больше, чем знал до того, забывая, что все же историческая родина светодиодов именно тут, в России.

Получить истинную картину поведения характеристик светодиодов было важной задачей того времени, актуальна она и сейчас. Данная статья посвящена исследованиям зависимостей ключевых параметров самых востребованных и «интересных» с точки зрения перспектив использования излучающих кристаллов, которые начались непосредственно с массовым приходом светодиодов в наше отечество. Нарботка отдельных типов кристаллов насчитывает уже 6–7 лет, что составляет не менее 50 000 ч. В работе не ставилась задача сравнения полученных данных с информацией производителя, интерес представляло исследование поведения реальных промышленных кристаллов в соответствии с общим знанием о физике работы полупроводниковых излучающих гетероструктур.

## Чтобы хорошо научиться чинить, нужно уметь правильно ломать

Для эксперимента по изучению деградации были выбраны наиболее известные кристаллы фирмы Cree — MBright и EZR, выращенные на подложках SiC и имеющие один омический контакт для подсоединения контактного проводника, а также кристаллы Epistar на сапфировых подложках. Их внешний вид показан на рис. 1.

Каждая группа кристаллов различных ранков содержала 10–30 образцов с близкими начальными характеристиками. Заведомо были выбраны ранки с различными доминирующими длинами волн в диапазоне 460–505 нм и на различных подложках, относящиеся,

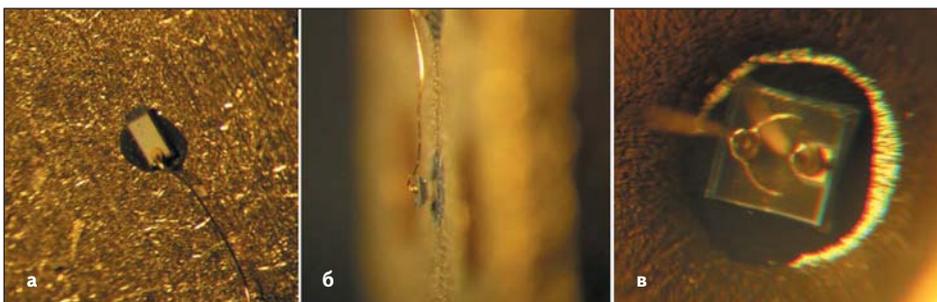


Рис. 1. Кристаллы: а) Cree EZR; б) Cree MBright; в) Epistar ES-CEBHV13

**Таблица 1.** Результаты исследований параметров излучающих кристаллов на основе InGaN при непрерывной наработке в течение 4–5 лет

Тип кристалла	Cree EZR-27 C460EZR260-0127			Cree MB-10 C470MB290-0209			Epistar ES-CEBHV13			
	Параметр	До наработки	35 000 ч	Изменение	До наработки	40 000 ч	Изменение	До наработки	41 000 ч	Изменение
Длина волны доминирующая, нм			461,4			466,94			503,6	
Полуширина спектра, нм			19,5			24,5			27	
Мощность излучения, Вт	0,031			0,01			0,009			
Световой поток, лм	1,51	1,39	-7,46%	0,63	0,48	-23,81%	2,59	1,97	-24,13%	
Сила света максимальная, кд	0,47	0,46	-3,95%	0,11	0,10	-8,39%	5,18	3,51	-32,20%	
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	39,14			64,00			44,44			
Потребляемый ток, А	0,04	0,04		0,04	0,04		0,04	0,04		
Прямое напряжение, В	3,229	3,201	-0,028	3,613	3,672	0,059	3,521	3,572	0,051	
Потребляемая мощность, Вт	0,129	0,128	-0,001	0,145	0,147	0,002	0,141	0,143	0,002	
Световая эффективность, лм/Вт	11,66	10,88	-6,65%	4,36	3,27	-25,03%	18,42	13,77	-25,21%	

однако, к одному типу материалов эпитаксиальных структур, отличающихся преимущественно только содержанием индия в активном слое. Это было сделано для удобства сравнения поведения параметров кристаллов с наработкой не только различных производителей, но и выяснения степени влияния материала подложки на деградационные характеристики. Следует отметить, что в исследовании применялся особый тип посадки кристаллов на специальный держатель, позволяющий использовать данные кристаллы с повышенной плотностью тока при наработке, что также было предметом изучения.

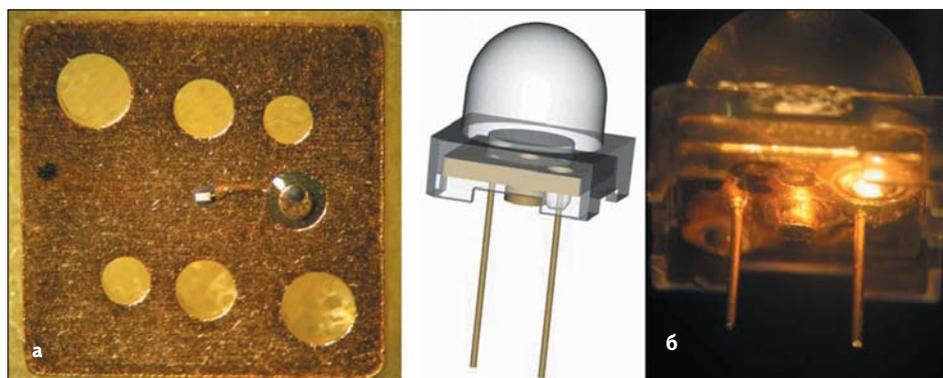
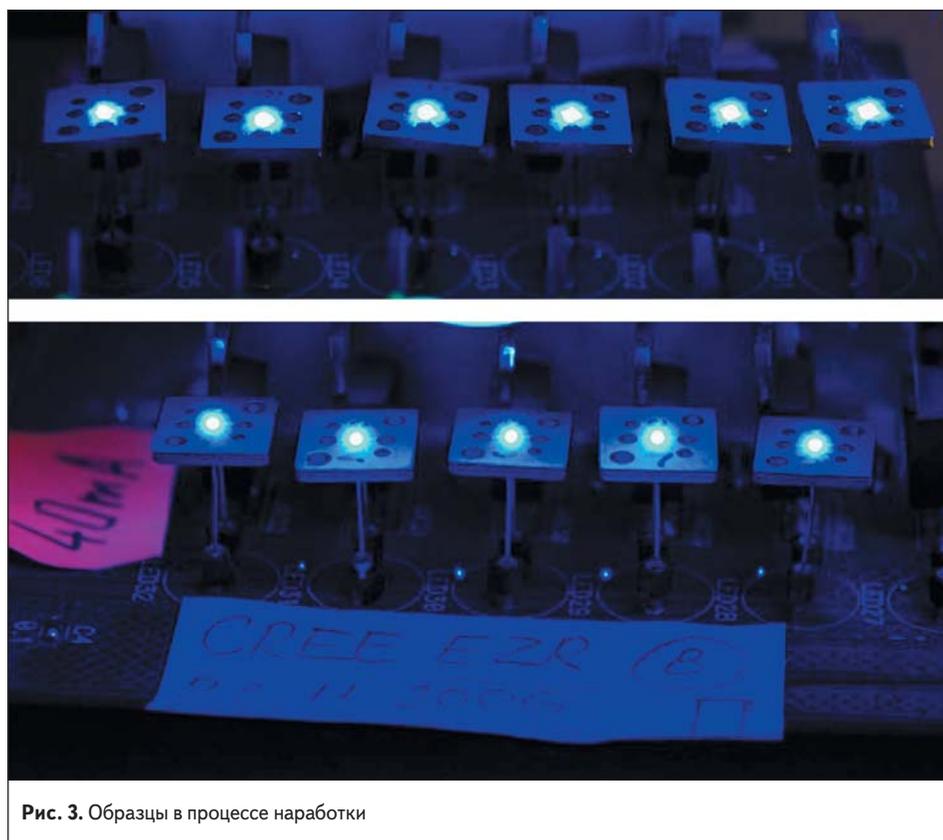
Для устранения действия повышенной температуры, возникающей в активной области кристалла и могущей существенно повлиять на деградационные характеристики (зависимости значений различных величин от времени наработки) параметров, был применен эффективный с точки зрения отвода тепла кристаллодержатель без первичной оптики (параболической лунки), являющийся основой светодиода, описанного в [2] (рис. 2а). Подобный кристаллодержатель уже был использован ранее для изучения фотометрических характеристик кристаллов без оптики, например в [3], и показал себя с наилучшей стороны для проведения экспериментов и эксплуатации излучающих кристаллов размером до 0,3×0,3 мм в составе светодиодов при плотностях тока до 100 А/см<sup>2</sup>.

В настоящей работе также проводились исследования и с большими плотностями тока (до 130 А/см<sup>2</sup>), для чего применялся особый кристаллодержатель с дополнительным теплоотводом, однако для удобства измерений фотометрических характеристик такие образцы были оформлены в светодиоды с оптической системой (рис. 2б). Стоит отметить, что производство образцов отличалось особой тщательностью и контролем качества выполнения каждой технологической операции, несоблюдение которой могло привести к причине деградации того или иного параметра и формированию неправильных выводов по результатам эксперимента. При изготовлении образцов использовался опыт выявления и классификации дефектов, описанных в [1]. Процесс наработки и внешний вид исследуемых образцов показан на рис. 3.

Полученные параметры представлены в таблице 1. В ней содержатся 2 типа синих кристаллов Cree и сине-зеленый Epistar ES-CEBHV13. Все группы имеют приблизительно равное количество часов непрерывной наработки (4–5 лет). Можно заметить, что все образцы имеют различное

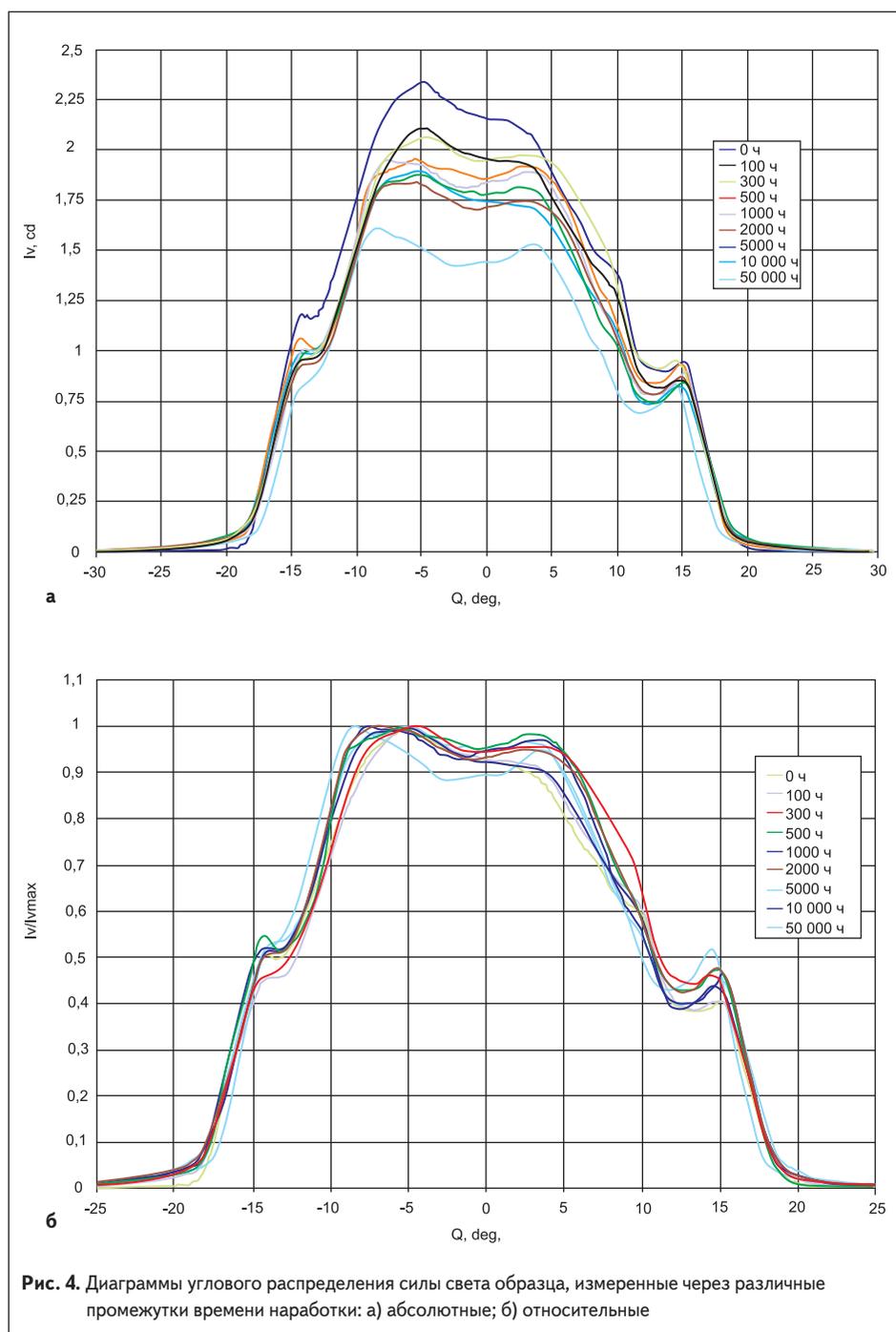
значение результирующего изменения светового потока и максимальной силы света. Это является показателем не только самого деградационного процесса светового потока, но и значительного его перераспределения по пространственной диаграмме излучения в процессе наработки. Причем не имеет значения, каков градиент взаимного изменения (у кристалла

Epistar он имеет противоположный знак: сила света изменилась больше, чем поток). Показатели деградации энергетических характеристик излучения у всех образцов находятся в зависимости от плотности тока, а их значения свидетельствуют о высоком качестве выращенных гетероструктур. Можно сделать вывод о том, что несмотря на увеличенную плотность


**Рис. 2.** Различные конструкции кристаллодержателей: а) на плотность тока до 100 А/см<sup>2</sup>; б) с повышенным теплоотводом на плотность тока до 150 А/см<sup>2</sup>

**Рис. 3.** Образцы в процессе наработки

**Таблица 2.** Результаты исследований параметров излучающих кристаллов на основе InGaN при непрерывной наработке в течение не менее 6 лет (50 000 ч) с повышенной плотностью тока

Тип кристалла	Cree MB-8 C460MB290-0207			Cree MB-10 C470MB290-0206		
	До наработки	50 000 ч	Изменение	До наработки	50 000 ч	Изменение
Длина волны доминирующая, нм	460,37	461,68	1,31	468,88	469,59	0,70
Полуширина спектра, нм	26,50	29,00	2,50	26,00	27,00	1,00
Мощность излучения, Вт	0,012			0,015		
Световой поток, лм	0,61	0,45	-25,30%	1,14	0,90	-20,72%
Сила света максимальная, кд	3,73	1,61	-56,97%	7,88	3,30	-58,13%
Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	128			128		
Потребляемый ток, А	0,08	0,08		0,08	0,08	
Прямое напряжение, В	4,311	4,864	0,553	5,455	5,970	0,515
Потребляемая мощность, Вт	0,345	0,389	0,044	0,436	0,478	0,041
Световая эффективность, лм/Вт	1,76	1,16	-33,79%	2,60	1,88	-27,56%



тока (рекомендация производителя — вдвое меньше), излучающие кристаллы потеряли около четверти светового потока почти за 5 лет непрерывной работы, что, по мнению производителей и по теоретическим прогнозам, является нормальной величиной. Если бы плотность тока была штатной при таком же теплоотводе, показатели деградации были бы существенно ниже.

Несмотря на самую высокую плотность тока, кристаллы Cree-MB имеют одинаковые характеристики изменения светового потока с кристаллами Epistar. Это объясняется большей подверженностью такому изменению материалов с большим содержанием индия в активной области.

Также наглядно проявили себя и кристаллы Cree EZR. Имея меньшее напряжение смещения при одинаковом прямом токе (что является одним из основных преимуществ малой толщины примененной подложки SiC) и обладая гораздо большей световой эффективностью, образцы работают в существенно лучших температурных условиях при равнозначном теплоотводе. Также можно сказать и о конструктивных особенностях кристалла (в виде прямоугольника) — его площадь больше, соответственно плотность тока меньше. Все эти факторы положительно сказываются на ходе деградационных характеристик, и можно заметить, что световой поток у этих кристаллов изменился втрое меньше, чем у остальных при прочих равных условиях. И это, прежде всего, подтверждение эффективности применения усовершенствованной технологии производства кристаллов, начатой в предыдущей серии Cree XThin.

Общим итогом полученных результатов в этой части эксперимента может стать вывод о подтверждении предположения о независимости хода деградационных характеристик излучающих структур от материала подложки, на которой они выращены, при преобладающем влиянии состава материала самой гетероструктуры. Также стоит отметить высокую степень соответствия полученных результатов результатам моделирования поведения таких характеристик на основе данных по первым 1000–3000 ч наработки, описанных в [5]. Некоторые варианты применения методов прогнозирования измене-

ния светового потока во времени на срок до 100 000 ч представлены на примере результатов исследования аналогичных кристаллов с еще большей плотностью тока в течение не менее 50 000 ч (табл. 2).

В этой части исследования изучалось поведение характеристик кристаллов Cree-MB различных рангов по мощности излучения и по длине волны. Ввиду большой плотности тока ( $128 \text{ A/cm}^2$ ) был применен кристаллодержатель, показанный на рис. 26. Такие условия в еще большей степени смогли катализировать процессы деградации, если у образцов к ним имелась предрасположенность даже в небольшой степени.

По представленным в таблице 2 результатам можно заметить, что изменение светового потока оказалось таким же, как и у предыдущих образцов с вдвое меньшей плотностью тока. Существенно увеличилось лишь его перераспределение по диаграмме излучения, о чем свидетельствует значительно большее снижение максимальной силы света. Для наглядности представления сказанного приведем пример из расчетов параметров на отдельных этапах эксперимента. На рис. 4 показаны семейства диаграмм углового распределения силы света, измеренные в различные моменты в течение срока наработки. По ним можно заметить, что у данного образца уменьшение светового потока наблюдалось преимущественно в средней части кристалла, где находится омический контакт. Это обусловлено неравномерным распределением тока по объему кристалла и, соответственно, самым высоким его значением в непосредственной близости от контакта. Отсюда и наибольшая деградация излучательных свойств структуры. Данный эффект был усилен оптической системой образца, сформировавшей представленную диаграмму. На рис. 4б показаны относительные диаграммы углового распределения силы света, на которых хорошо видно, как меняется форма кривых в зависимости от времени наработки, что и определяет не только изменение интегрального светового потока, но и его перераспределение. Стоит добавить, что на рисунке показана только одна плоскость излучения, другие могут иметь совершенно отличающиеся зависимости изменения, поэтому в таблице приведены интегральные значения не только по разным плоскостям излучения образца, но и по всем образцам в этой группе.

Такой подход к анализу результатов позволяет достоверно выявить причины появления изменения указанного параметра, которые оказываются привязанными к геометрии светодиода или отдельного кристалла [5, 6].

## Работа над ошибками

Однако особый интерес представляет не констатация факта изменения того или иного параметра, а возможность спрогнозировать его еще в начале эксплуатации — подобно постановке диагноза в медицине. Но здесь это выполняется не для того, чтобы «вылечить», потому что это маловероятно, а для того, чтобы

знать об изделии больше, чем просто список начальных параметров. Поэтому результаты исследований изменения характеристик светодиодов во времени используются для разработки методов производственного контроля продукции на предмет прогноза потенциальной степени деградации параметров. Возможность проверить верность выбранного пути для работы над такими методиками представилась по мере накопления результатов эксперимента. По истечении определенного времени наработки образцов составлялся прогноз дальнейшего хода изменения их светового потока на основе данных, получаемых к тому моменту времени. Как только время наработки достигало про-

гнозируемой точки, появлялась возможность реально проверить расчеты и, соответственно, достоверность метода.

Далее приведен пример такого сравнения (рис. 5), выполненный на основе методов, описанных в [5, 6]. На графике (рис. 5а) изображена деградационная характеристика светового потока группы кристаллов Cree MB-8 C460MB290-0207, приведенных в таблице 2. Можно заметить уже обсуждавшееся различие в градиентах изменения светового потока и силы света. Видно, что период стабилизации параметров длится около 2 000 ч, что, несмотря на высокую плотность тока, является обычным явлением. На рис. 5б на кривую изменения

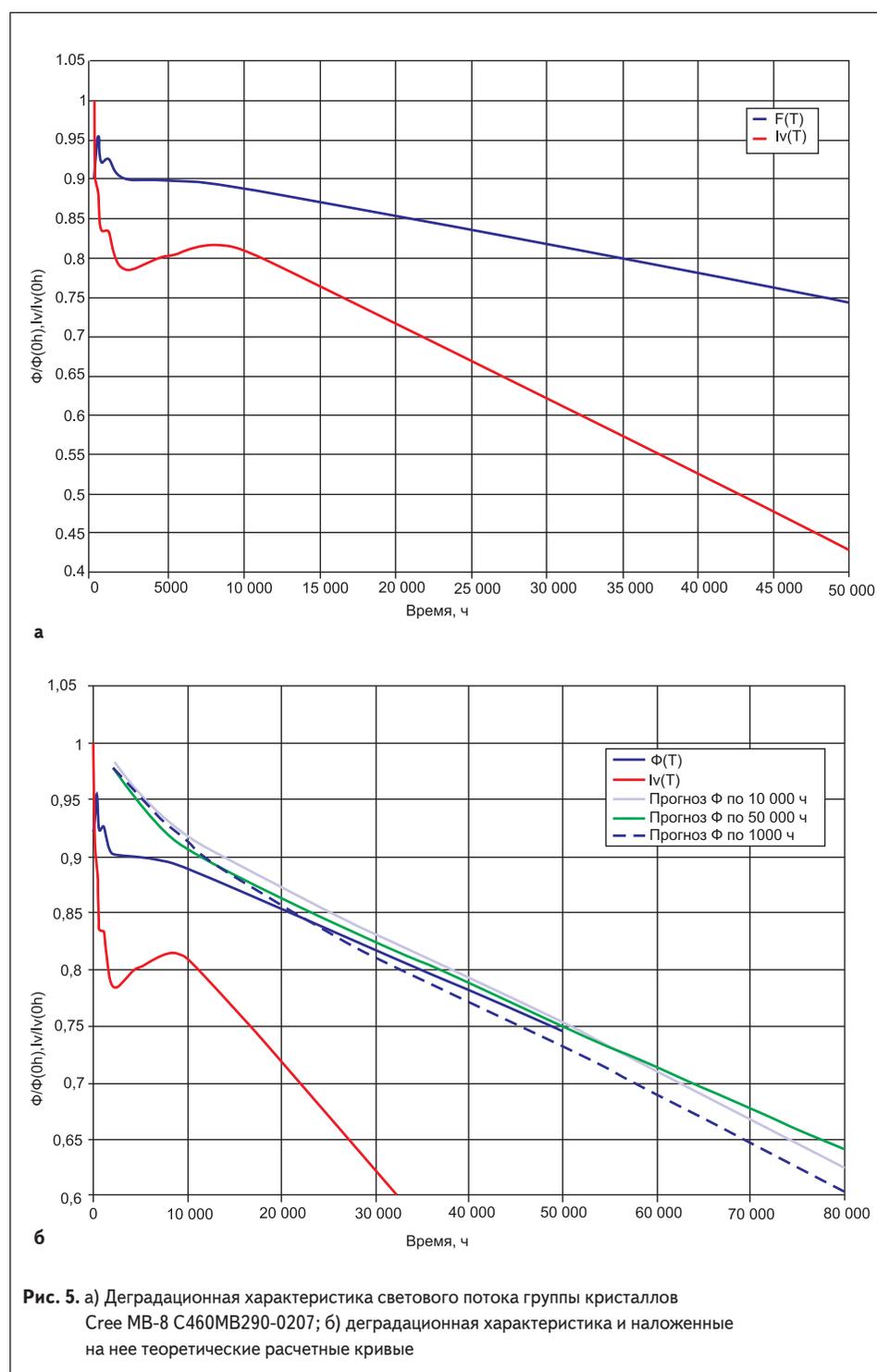
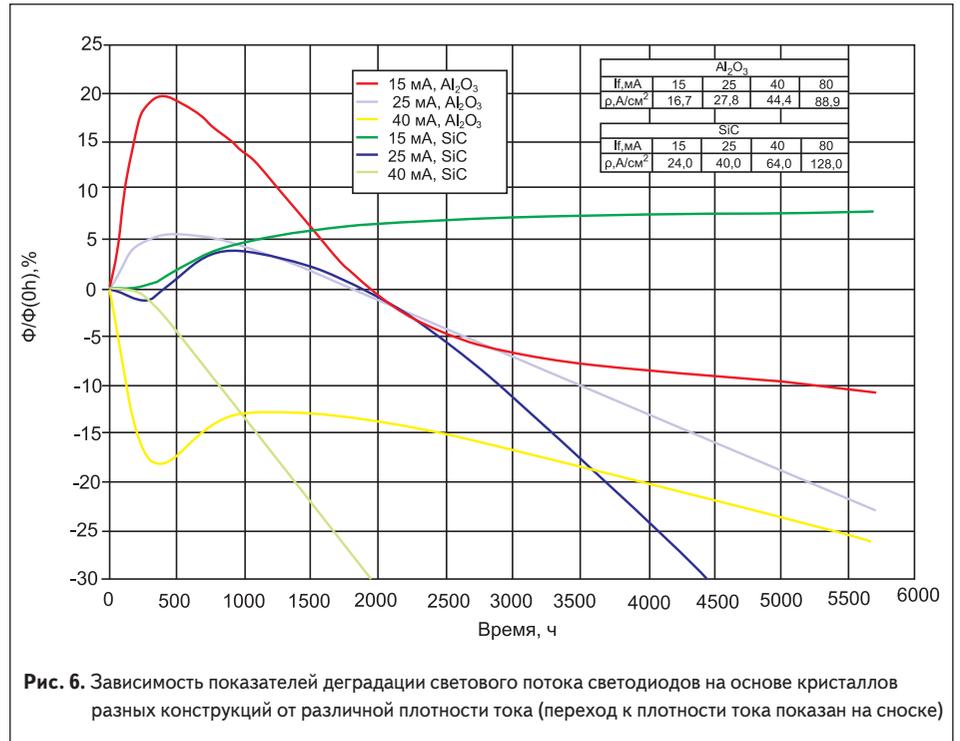


Рис. 5. а) Деградационная характеристика светового потока группы кристаллов Cree MB-8 C460MB290-0207; б) деградационная характеристика и наложенные на нее теоретические расчетные кривые

## НОВОСТИ



светового потока наложены расчетные зависимости, в получении которых были использованы данные об изменении светового потока за разное время наработки. Можно заметить, что наибольшая точность, как и предполагалось, соответствует кривой с самым большим сроком использованных данных, что, однако, не умаляет эффективности других расчетных зависимостей, достоверность которых незначительно меньше, зато есть самое важное достоинство — ранний срок «поставки диагноза».

В заключение — немного о справедливости выводов по качеству исследованных структур в связи с использованием их при описанных плотностях тока, существенно превышающих штатные. Помимо рассуждений о применении в эксперименте особых кристаллодержателей с необходимыми для рассеивания выделяемой тепловой мощности характеристиками, испытаниям «на прочность» и долговечность были подвергнуты обычные светодиоды в 5-мм стандартных корпусах на основе подобных кристаллов. Эти исследования проводились при различных плотностях тока через кристалл с целью определения адекватности поведения деградационных характеристик при условиях, рекомендованных производителем теплоотвода (в составе светодиода), и сравнения с полученными зависимостями при плотностях, примененных в эксперименте. Наглядно итоги измерений выглядят так, как показано на рис. 6. Сравнивая ход деградационных характеристик светового потока с графиками, приведенными на рис. 5, можно заметить, что, несмотря на значительно большую плотность тока, ни в одной из групп образцов, представленных в таблицах 1 и 2, не наблюдается таких высоких показателей деградации светового потока за приведенное на графике время (кривые для 40 мА на рис. 6),

которые свидетельствовали бы о превышении эффективности теплоотводящей функции кристаллодержателя и преобладании механизмов деградации, связанных с повышенной температурой. Этот факт подтверждает корректность выбора режима работы исследуемых образцов в процессе наработки и рассчитанных прогнозов поведения характеристик изменения параметров во времени. Следовательно, можно считать применение полученных результатов на практике полностью оправданным. ●

## Литература

1. Никифоров С. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // Компоненты и технологии. 2005. № 7.
2. Пат. № 2114492 (РФ) Светоизлучающий диод (Светоизлучающий диод с линзой на основе макролона и улучшенным теплоотводом) / В. С. Абрамов, Н. М. Беленьков, С. И. Денисов, Н. В. Щербаков // Бюл. 1998.
3. Никифоров С. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным // Компоненты и технологии. 2006. № 3.
4. Никифоров С. Исследование параметров семейства светодиодов Cree XLamp // Компоненты и технологии. 2006. № 11.
5. Никифоров С. Г. Разработка методик контроля деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInP и AlGaInN: Диссертация на соиск. уч. ст. канд. тех. н. М., 2007.
6. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Доклад на конференции «Нитриды галлия и алюминия». М.: МГУ. 2007.