

Сергей Никифоров, к.т.н. | snikiforov@list-lab.ru

Светодиоды с кристаллами от SemiLEDs

«под микроскопом»

Статья посвящена исследованиям мощных светодиодов на основе излучающих кристаллов фирмы SemiLEDs, предназначенных для использования в освещении. Благодаря новой технологии, использующей перенос выращенных на стандартной подложке гетероструктур на другую основу, и оригинальной конфигурации данные кристаллы претендуют на особое место среди аналогов. Детальное взвешивание всех «за» и «против» проводилось в компании «Л.И.С.Т.» («Лаборатория Исследования Световых Технологий») на примере изучения деградационных характеристик светодиодов в течение 6000 ч наработки. Описаны и обоснованы методы измерений отдельных параметров. Показаны практические стороны применения светодиодов на основе кристаллов SemiLEDs. Полученные данные могут быть полезны разработчикам устройств светотехники, потребителям и дистрибьюторам продукта.

Недавно российский рынок пополнился быстро ставшим популярным еще одним вариантом мощных светодиодов белого цвета свечения с люминофорным покрытием на основе излучающих кристаллов производства американской фирмы SemiLEDs. Особая, отличная от других технология производства кристаллов с InGaN-гетероструктурой для мощных светодиодов стала основным фактором в формировании не только высоких энергетических характеристик выпускаемых светодиодов, но и цены на кристаллы. Светодиоды на редкость быстро прошли путь от тестирования до применения в серийных изделиях светотехники, такой как уличные или офисные светильники, не говоря уже об использовании их в декоративных целях. Причина тому очевидна: имея практически одинаковые с ведущими марками аналогов светотехнические характеристики, они стоят в несколько раз дешевле. Таким образом, быстро приобретая популярность, упомянутые

светодиоды создают реальную конкуренцию дорогим брендам, разработчики которых, однако, уверены в своих силах и не сомневаются в правильности своего пути. Попытка разобраться в данной ситуации, предпринятая силами лаборатории «Л.И.С.Т.», поможет сделать правильный выбор потребителю светотехники, который обычно оказывается крайним звеном всех рыночных баталий и, «подсчитав цыплят по осени», частенько обнаруживает совершенно не такой результат своих трудов, на какой рассчитывал, сделав ставку на SemiLEDs.

Что же там светится?

Особенность излучающих кристаллов от SemiLEDs заключается в переносе выращенной на подложке Al_2O_3 гетероструктуры на металлическую основу. Сложность состоит в подборе буферных слоев, которые должны сглаживать изменение геометрических параметров мате-

риалов при нагреве электрическим током активного слоя гетероперехода, потому как тонкий и механически напряженный эпитаксиальный слой InGaN крайне чувствителен к разности давлений, приложенных с разных сторон кристалла. С подобными проблемами сталкиваются практически все производители, потому что большинство из них занимается переносом выращенных структур на другие подложки. Кроме того, новая подложка должна обладать прекрасной теплопроводностью и быть электропроводна. Только такие условия могут обеспечивать нормальную и длительную работу активного слоя кристалла при подобном типе конструктива. Схематически конструкция кристалла показана на рис. 1 [1].

Также стоит упомянуть о необходимости изготовления качественного отражающего слоя под нижней площадкой кристалла, чтобы излучение от соответствующей грани не поглотилось низлежащим металлом, на который перенесена структура. В случае с подложками Al_2O_3 или SiC данный вопрос решается просто: эти подложки прозрачны.

В настоящее время компания SemiLEDs промышленно производит около полутора десятков типов кристаллов с указанными конструкцией размерами стороны квадрата от 400 до 1520 мкм, излучающих в диапазоне 450–475 нм, а также 2 типа с зеленым цветом свечения (500–535 нм) и 3 типа ультрафиолетовых (360–420 нм). Первый тип используется в основном для производства белых светодиодов с люминофором. Наибольший интерес представляют поставляемые на сборку светодиодов кристал-

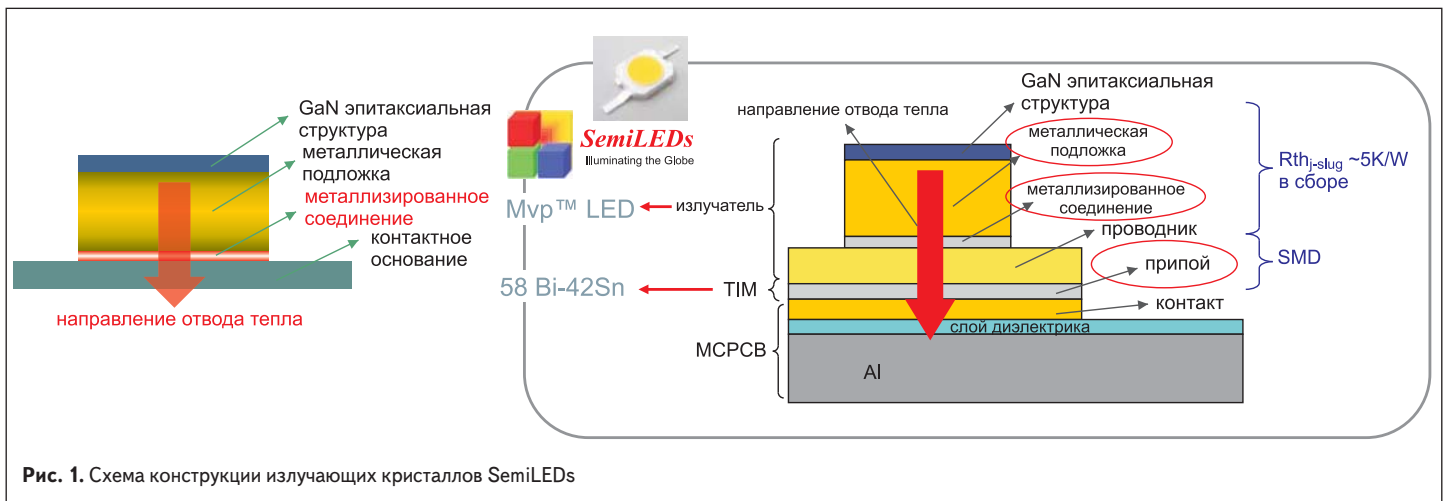


Рис. 1. Схема конструкции излучающих кристаллов SemiLEDs

лы с уже нанесенным люминофором. Самое массовое производство светодиодов сосредоточено по южнокитайскому региону, а также на Тайване. Однако и в нашем отечестве, обладающем различными технологиями монтажа кристаллов, продукция SemiLEDs оказалась востребованной.

Одними из первых стали «упаковывать» кристаллы в стандартные корпуса тайваньцы из фирмы Helios Crew, и именно их продукция была официально представлена у нас в стране руководством SemiLEDs как образец применения кристаллов. Однако эстафету быстро подхватили другие производители, и теперь зачастую трудно определить историю создания того или иного образца с кристаллом SemiLEDs. Это накладывает свой отпечаток на качество светодиодов из-за применения соответствующих (или нет) люминофорных покрытий и соблюдения технологических особенностей монтажа кристаллов при «упаковке». В результате различные светодиоды с кристаллами одного типа или «бина» будут отличаться своими параметрами и деградационными характеристиками. Так, например, на рис. 2 показаны 4 светодиода с однотипными (как

выявили измерения) кристаллами, но, как можно заметить, различным качеством и вариантами монтажа в корпус.

На первый взгляд, описанная технология производства кристаллов выглядит достаточно прогрессивной: все в предложенной конструкции последовательно и разумно, но какой бы красивой ни была идея, важен, прежде всего, результат ее реального использования. Проведенные исследования в данной статье умышленно будут описаны в виде объективного перечня полученных результатов измерений без обсуждения причин, по которым происходят, например, изменения параметров в процессе наработки. На основе большинства из них можно как просто сравнить новый продукт с аналогами, так и оценить предложенную SemiLEDs технологию уже с точки зрения готового продукта — светодиода.

**За решеткой волк.
На табличке написано: «заяц».
Верят табличке не все**

Описание параметров традиционно следует начать с представления сравнительной табли-

цы результатов, полученных при измерениях и заявляемых в спецификации. Таблица содержит данные по двум типам однотипных светодиодов на основе кристаллов SemiLEDs, а также один (правый) столбец с идентичными характеристиками аналогичных светодиодов CREE для удобства сравнения.

Можно заметить, что энергетические характеристики приборов очень близки: оптическая мощность излучения светодиодов практически равнозначна, что говорит о возможности формирования сходных фотометрических параметров на основе применяемых кристаллов. Также видно, что значение светового потока практически совпадает с заявленным параметром у светодиодов типа P20-W, да и световая эффективность довольно высока (около 93 лм/Вт) и одинакова с CREE. Этот факт действительно может поставить все представленные светодиоды в один ряд по своим характеристикам, однако если обратить внимание на коррелированную цветовую температуру, то можно внести поправку в этот вывод. Измерения спектральных параметров излучения, результаты которых попали в таблицу, проводились в районе оптической оси светодиодов (в цен-

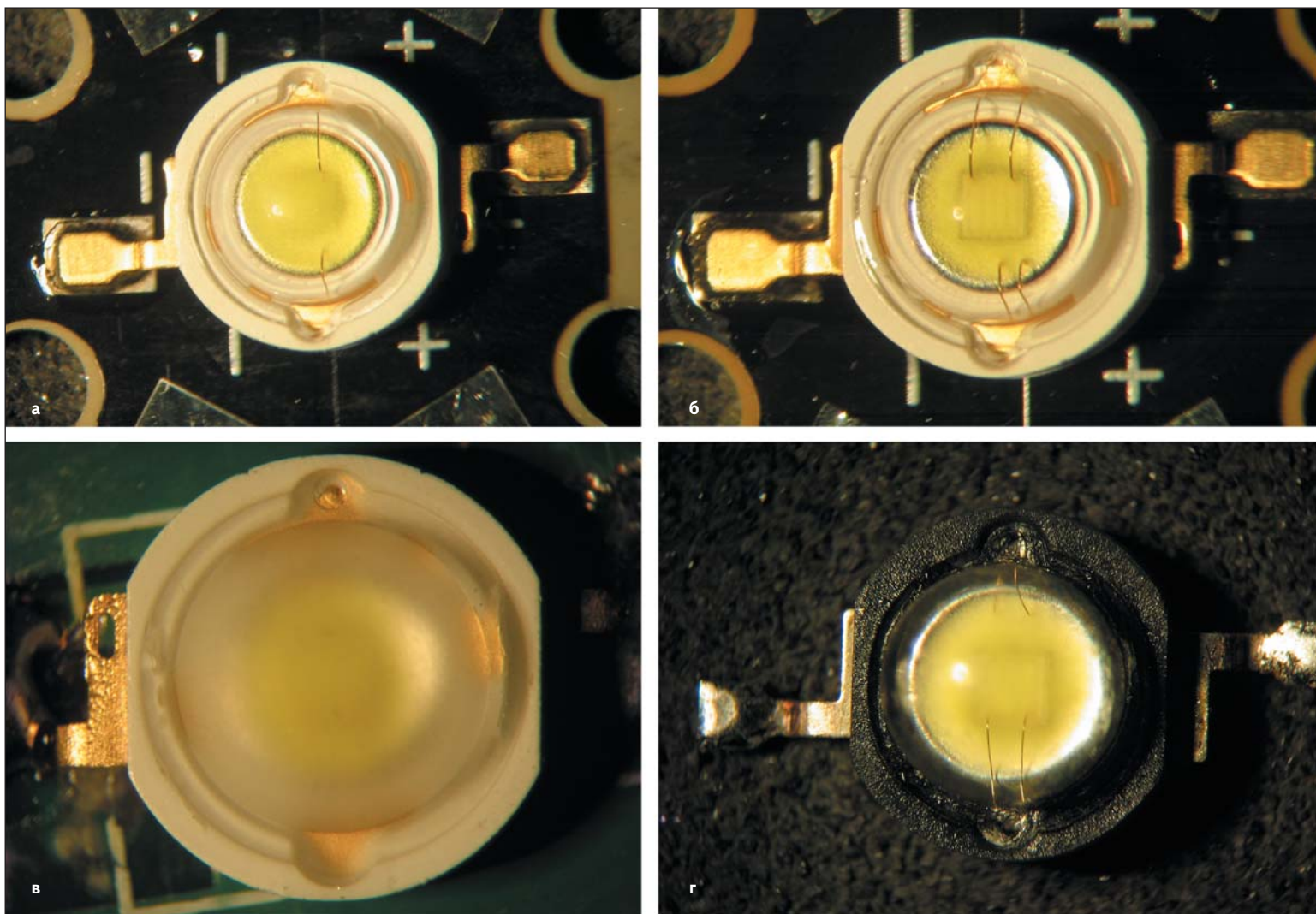


Рис. 2. Светодиоды на основе кристаллов SemiLEDs. Однотипные излучающие кристаллы смонтированы в различные корпуса светодиодов с близкими заявленными параметрами. Заметны отличия в монтаже: от «экономии» на приварке второй контактной нити (а) до применения поликарбонатных линз (в); б) и г) отличаются качеством материала корпуса светодиода и приварки контактных нитей.

тральной части линз) на расстоянии полного свечения (расстоянии, на котором явно закончено формирование хода лучей имеющейся линзой). Совершенно понятно, что когда речь идет о коррелированной цветовой температуре (или каких-либо иных характеристиках цветности излучения), имеется в виду некая совокупность всего производимого источником излучения и его среднее значение. И, тем не менее, светодиод, обладающий очень широкой диаграммой (в нашем случае — более 140° по уровню 0,5 Ivmax), может рассматриваться с такого же широкого спектра углов наблюдателем со стандартными условиями МКО — углом зрения 1 град. Соответственно, если колориметрические характеристики по диаграмме излучения будут существенно неравномерными, это обязательно заметит наблюдатель, и никакие объяснения об «интегральности» этого параметра будут уже неуместны. Это утверждение доказывает правомерность использованных методик измерений относительного спектрального распределения плотности энергетической яркости (ОСПЭЯ) в зависимости от угла излучения, в отличие от стойкого желания прежних специалистов от метрологии света обязать проводить измерения в сферическом интеграторе и оценке ОСПЭЯ по потоку [2]. Таким образом, производитель, указывая в спецификации колори-

метрический параметр светодиода, исходя из представленных рассуждений, одновременно гарантирует, что, независимо от угла наблюдения, он не будет выходить за рамки обозначенных значений. Иначе нормирование цветных характеристик не будет иметь смысла. Посему мы имеем право рассуждать о соответствии спецификации полученных значений при измерениях в любых точках диаграмм излучения. В выбранном для представления в таблице случае были взяты, как уже говорилось, осевые значения ОСПЭЯ (как самые труднореализуемые в данной конструкции светодиодов с применением люминофора и оптики) и соответствующие расчетные величины. Как видно из таблицы, значения коррелированной цветовой температуры у светодиодов типа P20-W составляют почти 12000 и 8600 К соответственно, в то время как регламент производителя — 7000 и 6000 К. Не попали в собственный же регламент и светодиоды CREE, но у них это отличие существенно меньше. Данное обстоятельство и не позволяет приравнивать, казалось бы, одинаковые характеристики светового потока и эффективности светодиодов, представленных в таблице. Это легко объяснимо: получить высокую эффективность при более высоких цветковых температурах гораздо легче, но при этом производимое излучение

уже вряд ли можно назвать белым по цвету. О разбросах цветковых параметров светодиодов на основе кристаллов SemiLEDs будет сказано в следующей главе. Следует добавить, что построенные на таких светодиодах светильники будут обладать большой неравномерностью по цветовым параметрам, потому как для формирования необходимых диаграмм в соответствии с требованиями обязательно будет применена оптика, катализирующая эти эффекты. Другими словами, часть пятна засветки окажется откровенно синей или сине-фиолетовой (как правило, центральная, где и были сделаны измерения ОСПЭЯ), а ближе к краям цвет может быть изменен до желтого или желто-зеленого. При таких обстоятельствах также наверняка будут допущены ошибки при светотехническом проектировании. Если бы некоторые параметры со временем наработки светодиодов или светотехнических устройств на их основе не менялись, все было бы однозначно. Однако, как оказалось, эти изменения отнюдь не улучшают состояние с соответствием, обсуждаемым на примере таблицы. Понять это помогли исследования деградационных характеристик по применяемым в таких случаях лабораторией «Л.И.С.Т.» собственным методикам, результаты которых изложены в следующей главе.

Т а б л и ц а . Сравнительная таблица параметров светодиодов с кристаллами SemiLEDs

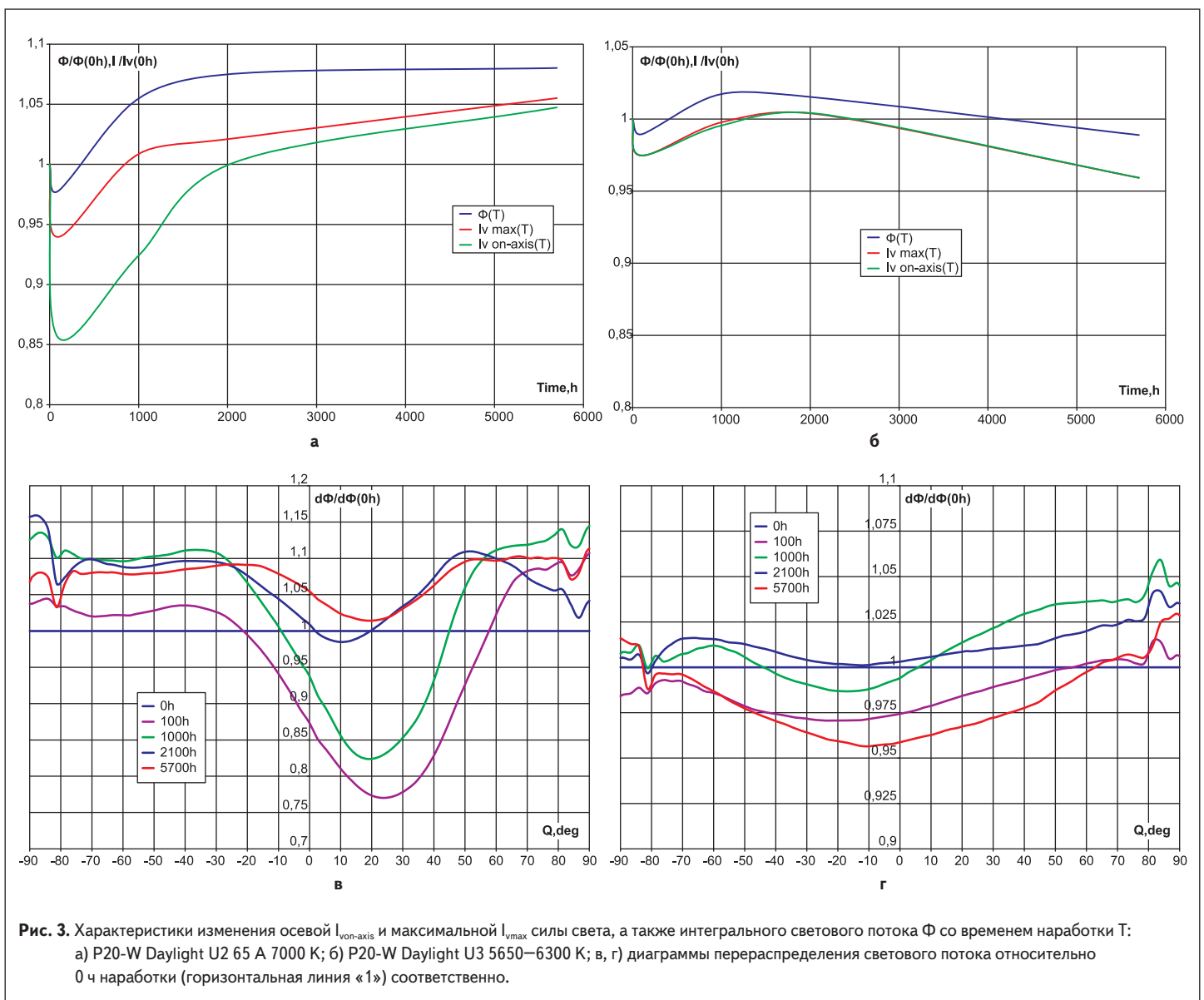
Тип светодиода	P20-W Daylight U2 65 A 7000 K		P20-W Daylight U3 5650–6300 K		XPEWHT-L1-0000-00F51 R3 T1		
	Полученные	Норма по D.S.	Полученные	Норма по D.S.	Полученные	Норма по D.S.	
Оптическая мощность, Вт	0,33		0,35		0,359		
Световой поток, лм	88,16	90–100	99,31	100–110	110,03	122–130	
Сила света максимальная, кд	22,25		21,02		32,43		
Сила света осевая, кд	22,14		21		32,37		
Освещенность по оси на расстоянии 2,5 м, лк	3,54		3,36		5,18		
Сила излучения максимальная, Вт/ср	0,083		0,073		0,106		
Угол излучения 2Q0,5lv	0–0	137,52	145	163,24	145	124,08	115
	0–45	136,91	145	163,27	145	126,76	115
	0–90	136,74	145	163,32	145	124,12	115
	45–0	137,24	145	163,57	145	127,81	115
	средний	137,10	145	163,35	145	125,69	115
Потребляемый ток, А	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	
Напряжение питания, В	2,94	3,2	3,05	3,2	3,368	3,2	
Потребляемая мощность, Вт	1,03	1,0	1,07	1,0	1,179	1,0	
Световая эффективность, лм/Вт	85,56		93,03		93,34		
Фотометрическое отношение, кд/кЛм	252,2		211,7		294,8		
КПД, %	32,07		32,44		30,41		
Спектральная световая эффективность, лм/Вт	266,78		286,82		306,9		
Энергетическая освещенность по оси на расстоянии 2,5 м, Вт/м²	0,013		0,012		0,03		
Длина волны максимальная, нм	454		450,5		452,5		
Длина волны центроидная, нм	533		545,5		543,5		
Ширина спектра излучения по уровню 0,5P, нм	19,5	140	20,5	140	22	140	
Ширина спектра излучения по уровню 0,1P, нм	216,5	260	231	260	239	250	
Координаты цветности:	X	0,2809	0,3068	0,2945	0,321	0,306	0,315
	Y	0,2643	0,3113	0,2868	0,335	0,318	0,35
	Z	0,4547		0,4188		0,377	
Доля ОСПЭЯ отн. V(λ), %	22,03		27,73		36,3		
Коррелированная цветовая температура (CCT), К	11972	7000	8646,8	5650–6300	7059	6000	
Цветовая температура по Планку (приведенная), К	5739,5		5682		7389,5		

Старость — не радость

Какими бы привлекательными ни были параметры светодиодов в начальный момент, до эксплуатации, самое интересное всегда происходит в процессе наработки: все экономические расчеты, светотехнические проекты, сроки окупаемости устройств светотехники и т. д. основываются на пророчествах производителей светодиодов о сроке их безотказной службы. И последние, в унисон с чиновничьим жонглированием цифрами, не скупятся на обещания в десятки отпущенных их детищу лет. Получается слаженный хор тех, кто поет именно то, что хотят от него услышать благодарные слушатели. Однако у светодиодов на этот счет свои мнения, и они не прощают плохого к ним отношения еще на стадии производства. Результаты измерений деградационных характеристик (иначе говоря — ухудшения параметров с течением времени) в той или иной мере приподнимают покров неизвестности над будущим исследуемых светодиодов, тем самым внося коррективы в планы и расчеты по их применению в конкретных условиях.

Переходя к полученным цифрам и характеристикам, следует добавить, что основной рассказ будет построен на графиках и зависимостях, как наиболее доходчиво воспринимаемых визуально. Для представления выбраны наиболее типичные исследованные образцы из групп, интегральные параметры которых показаны в таблице (светодиоды типа P20-W). Светодиоды изначально отличаются по большинству характеристик, несмотря на идентичность кристаллов, составляющих их основу. Для начала рассмотрим характер изменения силы света и светового потока, показанных на рис. 3а, б, со временем наработки. На рисунках видны значительные отличия в их поведении у групп с разными начальными коррелированными цветовыми температурами и световыми потоками. Под каждым графиком помещена соответствующая, спроецированная на плоскость диаграмма, показывающая перераспределение светового потока по диаграмме излучения со временем наработки (рис. 3в, г). Хорошо заметно, что в период стабилизации параметров (до 2000 ч наработки) значения светового потока, осо-

бенно в центральной части, могут уменьшаться вплоть до 25%, возрастая одновременно по краям. Это обстоятельство является следствием перераспределения интегрального потока по фотометрическому телу излучения и в различной степени позволяет ему сохраняться практически неизменным. Данный факт и причины его возникновения подробно описаны в [3]. Такое перераспределение присутствует в светодиодах всегда, но в разной степени, и может быть вызвано самыми разными причинами. В нашем случае, несмотря на замеченные метаморфозы, интегральное значение потока не только не изменяется, а неуклонно растет, как видно на рис. 3а, в. В то же время подвергшийся незначительному перераспределению световой поток второго образца (рис. 3б, г) уверенно снижается после достижения окончания периода стабилизации. Как выяснилось впоследствии, ни тот, ни другой случай не носил положительного характера в изменении параметров исследуемых светодиодов. Следует отметить, что в данном примере также фигурирует еще одно обстоятельство,



сопутствующее эффекту перераспределения светового потока, описанное ранее (в частности, в [3]): отличие в градиентах изменения силы света и светового потока во времени в зависимости от степени этого перераспределения. Как можно заметить, диаграммы, приведенные на рис. 3, указывают именно на это: высокая степень пере-

распределения на рис. 3в определяет существенную разницу в поведении зависимостей на рис. 3а.

Далее рассмотрим поведение спектральных характеристик излучения светодиодов в свете полученных результатов по перераспределению и изменению светового потока. Наиболее показательны здесь диаграммы ОСПЭЯ, измерен-

ные в различных временных отрезках исследуемого срока наработки, показанные на рис. 4 (а, в, д — для P20-W Daylight U2 65 A 7000 K; 6, г, е — для P20-W Daylight U3 5650-6300 K). На нем и последующих рисунках с диаграммами, так же как и на рис. 3, левый и правый столбцы рисунков соответствуют типам светодиодов, приведенным в таблице.

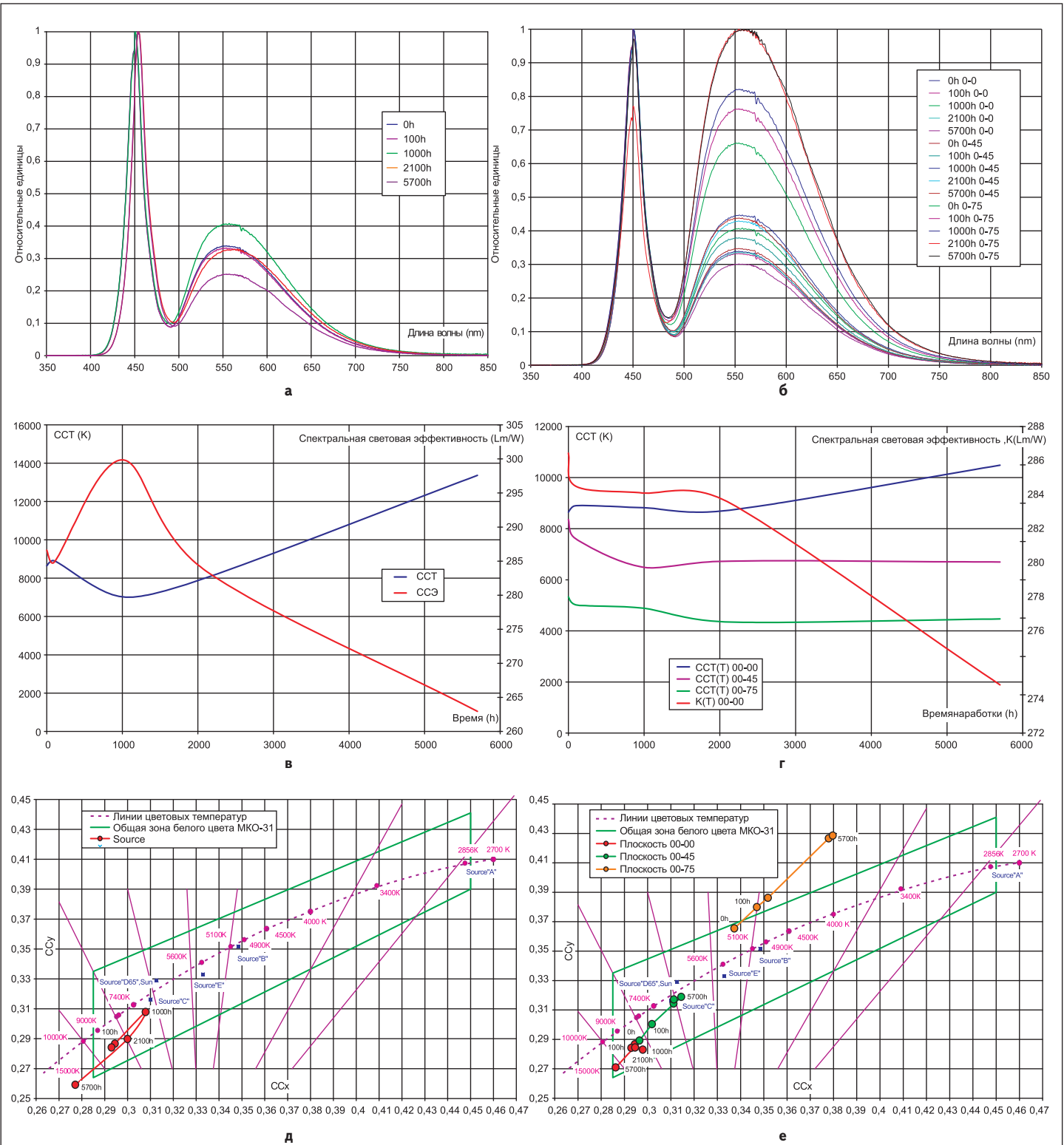


Рис. 4. Спектральные и колориметрические характеристики исследуемых светодиодов и их зависимости от времени наработки: а, б) диаграммы изменения ОСПЭЯ; в, г) диаграммы изменения спектральной световой эффективности и коррелированной цветовой температуры; д, е) диаграммы изменения координат цветности на цветовом графике МКО-31

Семейство графиков ОСПЭЯ хорошо объясняет и подчеркивает процесс изменений светового потока. Измерения ОСПЭЯ светодиодов с более низкой коррелированной цветовой температурой выполнены в нескольких плоскостях, поэтому график, приведенный на рис. 4б, отражает полную картину не только изменения значений светового потока в различных областях фотометрического тела, но и его спектрального состава. Угол наблюдения при измерении и временной отрезок в соответствии с цветом кривой обозначен на сноске. Можно заметить, что доля излучения от люминофора значительно повышается ближе к краям диаграммы излучения (0–75°) и увеличивается со временем. Если выразить полученные данные по ОСПЭЯ через значения коррелированной цветовой температуры, то изначальная (в 0 ч наработки) разница между осевым значением (положение наблюдателя в точке 0–0) и боковым (0–75°) составит почти 3500 К. Как показывает график, приведенный на рис. 4г, с течением времени эта разница увеличивается и к 6000 ч составляет уже 6000 К. Спектральная световая эффективность излучения снижается, что означает увеличение доли синего в интегральном световом потоке, несмотря на незначительное уменьше-

ние его значения (всего 2–3%, рис. 3б). Другими словами, в таких случаях говорят, что белый светодиод «посинел» со временем. Такой результат является следствием именно перераспределения светового потока и изменения исходной интенсивности излучения различных участков покрытого люминофором кристалла со временем наработки. Еще более наглядно это просматривается на расположенном ниже (рис. 4е) цветовом графике МКО-31, где показаны изменения координат цветности семейства ОСПЭЯ (рис. 4б). Оказалось, что неравномерность цветовых параметров по диаграмме излучения в данном светодиоде линейна и может быть описана практически гладкой прямой, начинающейся снизу, в области синего, и заканчивающейся сверху, в зоне цветов зеленоватого оттенка. Как было показано ранее, длина прямой со временем увеличивается, усугубляя ситуацию. Подобная картина имеется и у светодиодов с высокой начальной цветовой температурой по оси излучения (рис. 4а, в, д). Однако здесь можно встретить еще большую разницу между значениями температуры по истечении контрольного времени, а также неприемлемое ее значение (около 14000 К), указывающее на то, что цвет свечения уже явно

не является белым. Если связать эти результаты с изменением значений светового потока в те же отрезки времени в центральной области диаграммы (рис. 3в), где и происходило измерение ОСПЭЯ, то можно проследить непосредственную зависимость изменения потока и цветовой температуры: уменьшение потока вызвало в определенное время пропорциональное уменьшение температуры. Это утверждение иллюстрирует четкую и весьма информативную работу применяемой методики исследования характеристик изменения параметров во времени, предоставляя таким образом широкие возможности по определению причин этих метаморфоз, происходящих на уровне физики работы гетероструктуры. Следует также обратить внимание на изменение максимальной длины волны исходного синего — в какой-то момент времени она увеличилась почти на 4 нм. На фоне известных зависимостей, устанавливающих уход основных составляющих спектра излучения в длинноволновую область и определяющих этот процесс как нормальный, полученный сдвиг слишком масштабен. Обычно изменение пиковых длин волн в исследуемых гетероструктурах происходит лишь на доли нанометра за упомянутый промежуток времени. Поэтому

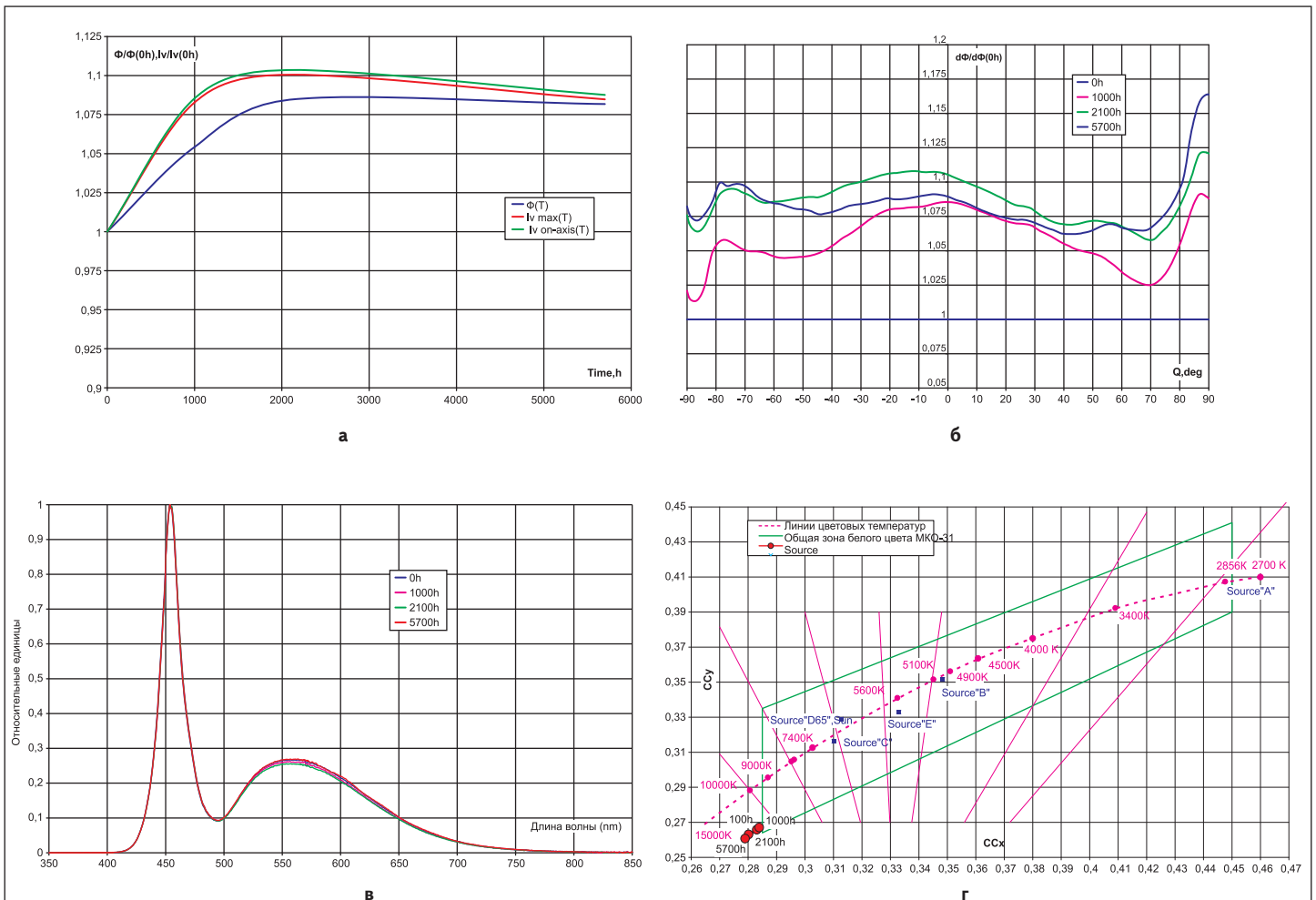
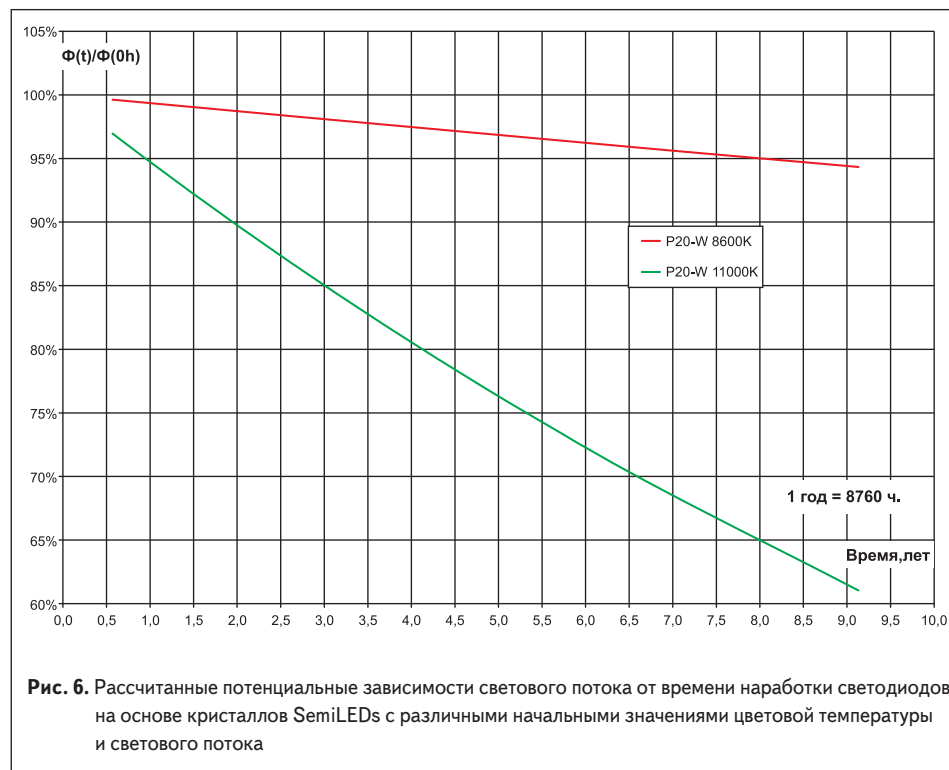


Рис. 5. Характеристики исследуемых светодиодов других типов и их зависимости от времени наработки: а) характеристики изменения осевой $I_{v, on-axis}$ и максимальной I_{vmax} силы света, а также интегрального светового потока Φ со временем наработки T ; б) соответствующие диаграммы перераспределения светового потока относительно 0 ч наработки (горизонтальная линия «1») соответственно; в) диаграммы изменения ОСПЭЯ; г) диаграмма изменения координат цветности на цветовом графике МКО-31



данное обстоятельство указывает на явное присутствие неких изменений, произошедших в работе или режиме работы излучающего кристалла. Рис. 4в, д иллюстрируют сказанное с точки зрения производных величин спектра. Отметим, что если бы на этих рисунках были также приведены данные по другим углам наблюдения (как на рис. 4б), то отражающая зависимость коррелированной цветовой температуры от угла излучения и времени наработки (рис. 4е) мнимая «прямая» линия на цветовом графике МКО-31 на рис. 4д была бы длиннее.

И, тем не менее, среди исследованных образцов присутствовали и те, чьи параметры и ход их изменения со временем укладывались в приемлемые рамки, соответствующие классу качества светодиодов ведущих производителей. Правда, полного соответствия спецификации при этом так и не было получено ни на одном из образцов. В качестве примера на рис. 5 (по аналогии с рис. 3 и 4) приведен комплекс диаграмм, раскрывающий динамику изменения характеристик во времени.

Здесь и в световом потоке, и в координатах цветности наблюдается стабильность, и это подтверждается в свою очередь малой степенью перераспределения потока (рис. 5б).

Стоит только добавить, что изначально этот тип светодиодов имел около 88 лм светового потока, а коррелированная цветовая температура составила немногим более 11000 К по оси.

Пользуясь полученными при измерениях данными и методиками расчета фактора деградации [3], были определены потенциальные временные зависимости светового потока на период до 80000 ч наработки при плотности тока, соответствующей 350 мА через кристалл. Несмотря на неплохие результаты расчетов, показанные на рис. 6, следует помнить, что столь малое падение зна-

чения светового потока будет сопровождаться существенным увеличением коррелированной цветовой температуры, сводящим результирующее излучение к синему цвету.

Победила дружба

Рассмотренный в статье светодиодный продукт пока еще находится на начальных стадиях становления, отсюда и выявленные путем исследований недостатки в характеристиках. Однако эта разработка с уверенностью может служить хорошим примером одного из прогрессивных шагов в области полупроводникового освещения. А поскольку речь идет о применении новшества в промышленной технологии производства излучающих кристаллов, то есть некоторая надежда на то, что в нашей стране как продукт будут востребованы именно рассмотренные продукты, а не светодиоды на их основе. Может быть, для отечественного производителя полупроводниковых приборов это станет еще одним поводом развить производство светодиодов у себя, используя готовые кристаллы, и, таким образом, имея налаженный рынок потребления пластин или готовых отечественных кристаллов, мы подойдем вплотную к промышленной эпитаксии гетероструктур.

Литература

1. www.semileds.com
2. Айзенберг Ю. Б. и др. Справочная книга по светотехнике. М.: Энергоиздат. 1995.
3. Никифоров С. Г., Сушков В. П. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN // Материалы конференции «Нитриды галлия и алюминия». МГУ. 2007.