

## Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным

Сергей НИКИФОРОВ  
nikiforov@screens.ru

Статья посвящена вопросам зависимостей параметров светодиодов от проходящего тока. Приведены подробные колориметрические характеристики большого спектра широко распространенных светодиодов на основе кристаллов с различными излучающими структурами и указана причина описанных зависимостей. Детально рассмотрены факторы, влияющие на перераспределение светового потока внутри диаграммы излучения светодиодов и изменение других важнейших светотехнических характеристик от величины проходящего тока. Показана высокая значимость деграционных характеристик в определении качества светодиодов и их взаимосвязь с токовыми зависимостями. Подняты некоторые вопросы технологии производства светодиодов в свете описанной проблемы.

### Электрический ток изменяет цвет

Зависимости параметров светодиодов от проходящего тока являются одними из самых заметных и распространенных характеристик. Несмотря на довольно качественную стабилизацию электрических режимов, при которых работают светодиоды в современных устройствах, даже небольшие расхождения в значениях заданных величин питающих напряжений и токов приводят к заметным изменениям параметров излучения. Данный факт является особенностью всех твердотельных источников света, использующих в своей конструкции полупроводниковый преобразователь электрического тока в свет на основе *p-n*-перехода благодаря существенной крутизне зависимости его выходных параметров от значений электрических величин. Изменение электрического тока через светодиод по причине действия дестабилизирующих факторов (например, температура окружающей среды) или установка его значения, отличающегося от указанного в документации, несомненно, приведет к заметным изменениям светотехнических и колориметрических характеристик светодиода и скажется на ходе их деградации по мере наработки, и соответственно, на общем сроке службы.

Современная тенденция использования систем управления режимами светодиодов все больше тяготеет к применению широтно-импульсной модуляции, где функцией интенсивности излучения светодиода является скважность импульсной последователь-

ности с постоянным значением тока через него в импульсе. Однако актуальность зависимостей параметров светодиодов от тока остается большой из-за существенных температурных уходов электрических характеристик светодиода, определяющих ток через него [1], и использованием возможности управлять не только временем рабочего состояния, но и значением тока в это время, делая систему управления режимами светодиода многомерной и максимально эффективной. Более того, типичные токовые зависимости параметров светодиодов могут быть приняты во внимание при проектировании устройств, где важно получение необходимого сочетания параметров нескольких типов светодиодов одного цвета или совокупности цветов. Подобную задачу можно достаточно просто решить с помощью подбора значений тока различных групп или отдельных приборов, воздействуя тем самым на параметры излучения в необходимой степени.

Влияние значения прямого тока  $I_f$  на параметры излучения светодиода обусловлено их существенной зависимостью от физических процессов, происходящих в излучающей полупроводниковой структуре кристалла. Изменение плотности тока через *p-n*-переход связано с изменением приложенного внешнего электрического поля (прямого напряжения  $U_f$ ) и определяет собой форму вольт-амперной характеристики. По мере роста значения внешнего приложенного поля будет увеличиваться энергия носителей заряда, и они будут способны преодолевать участки запрещенной зоны с большей энергией [1].

Пропорционально этому будет расти и их количество (что и есть плотность тока), увеличивая тем самым интенсивность излучения. Наглядно эти процессы можно наблюдать в любом светодиоде при изменении протекающего через него прямого тока  $I_f$ . Очевидно, что при малых его значениях излучение будет иметь спектр, состав которого будет соответствовать самым длинноволновым характеристикам данного типа излучающих структур. Однако рост плотности тока, связанный с увеличением внешнего электрического поля, вызовет не только вовлечение в процесс излучения участки запрещенной зоны с большей энергией, но и одновременное, непропорциональное этому росту, увеличение интенсивности излучения в участках с меньшей энергией. Это объясняет наличие в спектре излучения более пологого склона характеристики со стороны длинноволнового участка, особенно у структур с большой шириной запрещенной зоны, но отнюдь не означает однозначное смещение максимума спектра излучения в коротковолновую область из-за указанной непропорциональности. Скорее, гораздо более весомое влияние на параметры излучения будет оказывать увеличивающаяся с ростом плотности тока ширина спектрального распределения.

Все эти факторы образуют зависимость спектра излучения светодиода от проходящего прямого тока  $I_f$ , и, соответственно, всех сопутствующих спектру, колориметрических характеристик. Координаты цветности в зависимости от прямого тока показаны на рис. 1. Зависимости получены при питании светодиодов

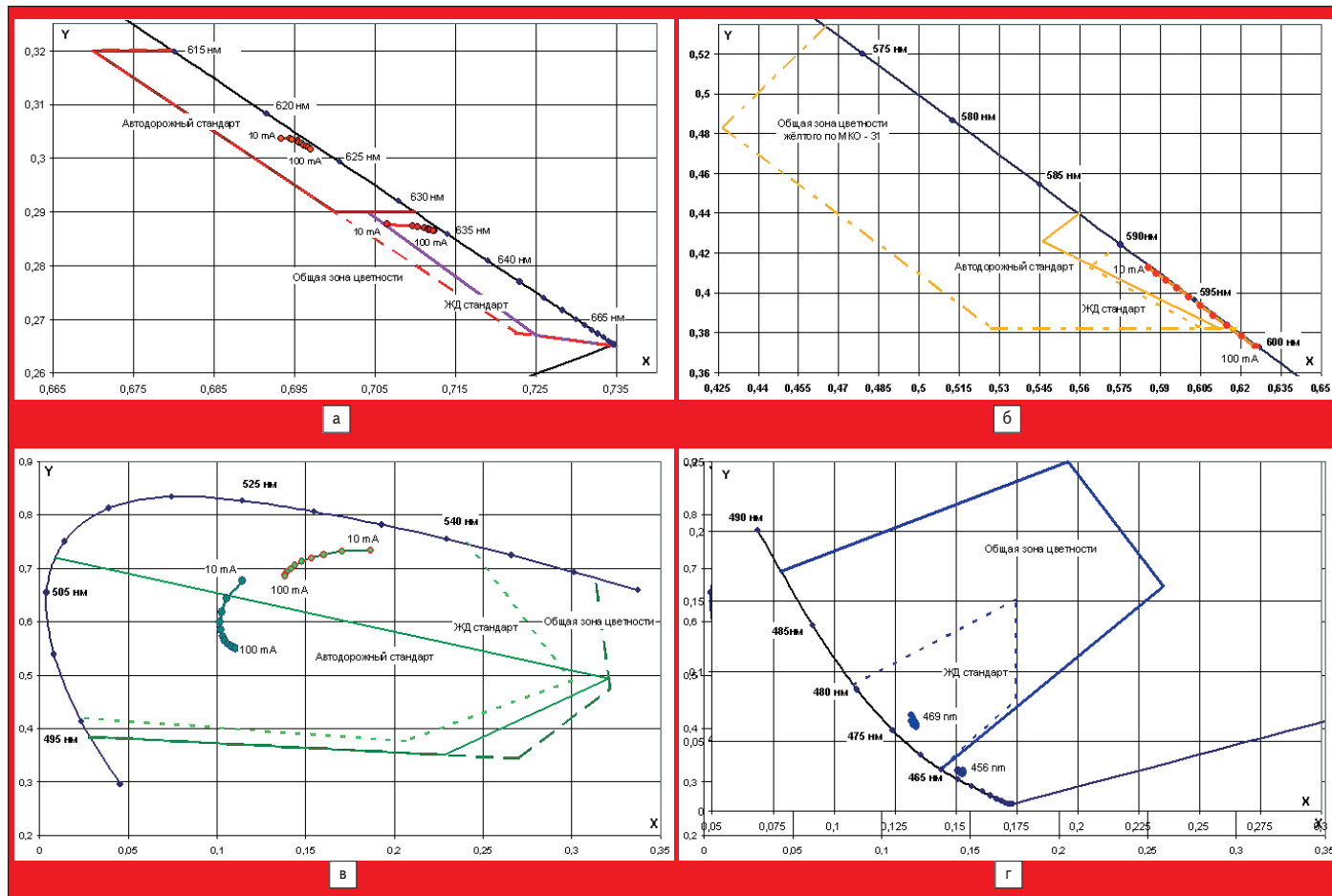


Рис. 1. Координаты цветности излучения светодиодов различных цветов на цветовом графике МКО — 1931 г. при различных токах через кристалл (величина дискрета — 10 мА, что соответствует точкам на графиках). Показаны границы зон цветностей, регламентированных различными стандартами  
а) красные, б) желтые, в) зеленые, г) синие

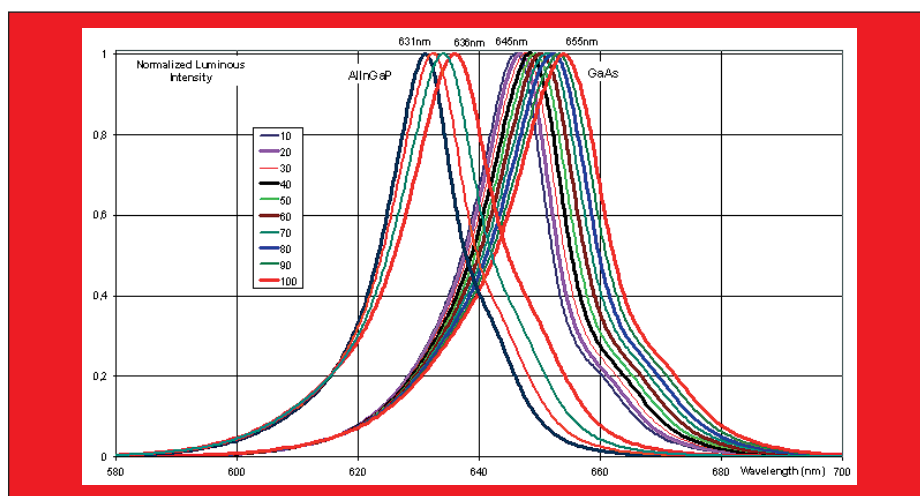


Рис. 2. Относительные спектральные характеристики излучения светодиодов красного цвета на кристаллах различных типов. В верхней части графика указан разброс максимальной длины волны  $L_{max}$  в зависимости от прямого тока (приведен на вставке в мА)

кратковременными импульсами тока, не приводящими к нагреву кристалла и исключая появление температурных зависимостей описываемых величин [1]. График в более длинноволновой области красного (рис. 1а) относится к светодиодам на основе

AlGaAs с доминирующей длиной волны около 636 нм, в более коротковолновой области — на основе AlInGaP на подложке GaP. Несмотря на незначительное изменение доминирующей длины волны  $L_{dom}$  в зависимости от тока (всего на доли нанометров),

такой сдвиг координат цветности обусловлен существенным увеличением ширины спектрального распределения (табл. 1, рис. 2). Изменение максимальной длины волны  $L_{max}$  в указанном диапазоне токов составляет около 10 нм.

Зависимость светодиодов желтого цвета на рис. 1б и рис. 3 с доминирующей длиной волны  $L_{dom} = 592$  нм (при 20 мА) на основе AlInGaP на подложке GaP указывает на значительный уход координат цветности при изменении тока. Это объясняется прежде всего высокой степенью легирования материала, составляющего гетероструктуру, для достижения необходимой ширины запрещенной зоны (более 2 эВ), что не может не повлиять на стабильность параметров. При определенных значениях тока с учетом температурных зависимостей колориметрических параметров [1] применение подобных приборов в системах световой сигнализации, регламентированных приведенными на графиках стандартами, может быть ограничено. Это создает некоторые трудности использования светодиодов в данных системах еще и из-за самых высоких требований по осевой силе света именно в сигналах желтого цвета (например, ГОСТ 25695-91).

**Таблица 1.** Подробные колориметрические характеристики светодиодов различных цветов в зависимости от прямого тока через кристалл

Параметры									Относительная спектральная световая эффективность, лм/Вт
I <sub>f</sub> , мА	X	Y	L <sub>dom</sub> , нм	L <sub>sep</sub> , нм	L <sub>max</sub> , нм	L1, нм	FWHM 0,5, нм	L2, нм	
Красные на основе GaAs									
10	0,7065	0,2877	634,17	644,09	645,90	637,11	14,08	651,19	108,99
20	0,7097	0,2874	634,07	644,82	647,44	637,51	14,59	652,10	106,83
30	0,7103	0,2872	634,18	645,70	648,81	638,05	15,09	653,14	103,91
40	0,7111	0,2870	634,33	646,62	647,24	638,63	15,59	654,23	100,92
50	0,7116	0,2868	634,42	647,31	648,65	639,27	16,09	655,36	97,88
60	0,7116	0,2867	634,54	648,11	649,86	639,88	16,64	656,52	94,83
70	0,7119	0,2866	634,60	648,98	650,78	640,49	17,18	657,67	91,88
80	0,7123	0,2865	634,59	649,88	651,67	641,15	17,66	658,81	89,04
90	0,7124	0,2865	634,63	650,80	652,89	641,81	18,16	659,97	86,25
100	0,7122	0,2865	634,66	651,74	654,19	642,44	18,74	661,18	83,55
Красные на основе AlInGaP									
10	0,6933	0,3036	622,59	629,86	630,93	623,23	13,58	636,80	190,40
20	0,6944	0,3036	622,55	630,16	630,21	623,31	14,05	637,36	189,67
30	0,6947	0,3034	622,66	630,70	632,32	623,55	14,41	637,96	187,46
40	0,6954	0,3032	622,78	631,04	631,36	623,82	14,90	638,71	185,21
50	0,6956	0,3029	622,93	631,69	633,29	624,14	15,33	639,46	182,30
60	0,6959	0,3027	623,07	632,08	632,14	624,44	15,84	640,28	179,38
70	0,6962	0,3024	623,22	632,74	633,98	624,82	16,26	641,08	176,32
80	0,6965	0,3022	623,36	633,28	635,71	625,16	16,82	641,98	173,18
90	0,6968	0,3019	623,49	633,85	634,40	625,53	17,36	642,89	169,91
100	0,6970	0,3017	623,64	634,83	636,15	625,94	17,88	643,82	166,50
Желтые на основе AlInGaP									
10	0,5856	0,4126	591,98	592,99	593,98	586,13	13,62	599,75	478,61
20	0,5887	0,4096	592,50	593,73	595,54	586,59	14,02	600,62	475,34
30	0,5923	0,4061	593,16	594,74	596,83	587,17	14,49	601,66	470,33
40	0,5963	0,4022	593,88	595,46	597,92	587,83	14,96	602,80	463,68
50	0,6005	0,3979	594,68	596,44	598,73	588,60	15,42	604,02	455,81
60	0,6051	0,3934	595,57	597,67	599,62	589,46	15,92	605,38	447,12
70	0,6099	0,3885	596,53	598,71	600,55	590,40	16,44	606,83	437,64
80	0,6149	0,3834	597,59	599,90	601,85	591,41	17,03	608,43	427,11
90	0,6202	0,3782	598,72	601,41	603,38	592,55	17,54	610,09	416,00
100	0,6257	0,3727	599,93	602,85	605,76	593,75	18,15	611,91	403,52
Зеленые на основе InGaN/AlGaIn/GaN									
10	0,1868	0,7336	530,92	525,69	523,87	508,41	31,41	539,82	513,35
20	0,1708	0,7310	527,65	522,83	520,59	505,88	31,01	536,90	490,83
30	0,1603	0,7253	525,24	520,88	518,44	503,87	31,30	535,17	473,75
40	0,1531	0,7188	523,34	519,91	515,19	502,30	31,74	534,04	461,22
50	0,1480	0,7119	521,82	518,72	514,05	501,05	32,21	533,26	450,58
60	0,1441	0,7051	520,51	517,69	515,53	500,01	32,65	532,66	441,68
70	0,1415	0,6986	519,51	516,91	513,67	499,15	33,12	532,27	434,31
80	0,1395	0,6928	518,72	516,61	514,54	498,42	33,61	532,03	429,21
90	0,1384	0,6873	518,09	515,99	512,13	497,81	34,11	531,92	424,49
100	0,1385	0,6849	517,90	515,92	512,15	497,59	34,44	532,03	423,38
Зеленые на основе InGaN/AlGaIn/GaN									
10	0,1143	0,6762	514,05	512,15	510,62	495,92	29,94	525,86	386,15
20	0,1055	0,6429	510,83	509,98	508,17	492,81	32,02	524,82	363,65
30	0,1027	0,6174	508,88	507,96	505,77	490,42	34,07	524,49	348,83
40	0,1017	0,5988	507,57	506,98	500,53	488,72	35,27	523,99	340,35
50	0,1020	0,5843	506,64	506,53	501,79	487,47	36,25	523,73	334,52
60	0,1031	0,5729	505,97	505,96	499,20	486,61	37,15	523,76	330,72
70	0,1043	0,5643	505,49	505,80	499,29	486,00	38,04	524,04	329,08
80	0,1061	0,5577	505,17	505,76	499,14	485,57	38,91	524,48	328,20
90	0,1081	0,5529	504,98	505,80	501,99	485,27	39,80	525,07	328,56
100	0,1103	0,5497	504,91	505,92	501,53	485,08	40,63	525,71	329,62
Голубые на основе InGaN/AlGaIn/GaN									
10	0,1318	0,0641	469,54	465,91	463,39	454,66	20,22	474,88	70,89
20	0,1328	0,0617	469,00	465,37	464,54	454,05	20,21	474,26	69,29
30	0,1334	0,0606	468,73	464,91	462,21	453,57	20,48	474,04	68,51
40	0,1338	0,0602	468,61	464,78	462,51	453,23	20,85	474,08	68,26
50	0,1339	0,0603	468,61	464,75	462,52	452,98	21,34	474,32	68,44
60	0,1339	0,0609	468,70	464,80	462,33	452,80	21,93	474,73	68,97
70	0,1337	0,0621	468,89	464,95	464,92	452,69	22,62	475,31	69,86
80	0,1333	0,0637	469,17	465,34	464,24	452,67	23,35	476,02	71,17
90	0,1327	0,0660	469,61	465,76	463,31	452,72	24,23	476,95	72,96
100	0,1319	0,0687	470,07	466,27	465,25	452,86	25,06	477,93	75,05
Синие на основе InGaN/AlGaIn/GaN									
10	0,1529	0,0291	455,92	451,70	449,14	441,29	18,60	459,89	37,78
20	0,1528	0,0278	455,59	451,12	449,79	440,95	18,48	459,44	36,62
30	0,1529	0,0272	455,35	450,84	450,14	440,52	18,84	459,36	35,99
40	0,1528	0,0269	455,30	450,74	450,22	440,16	19,36	459,52	35,64
50	0,1526	0,0267	455,37	450,73	450,02	439,89	19,95	459,84	35,51
60	0,1525	0,0270	455,55	450,80	449,59	439,68	20,63	460,31	35,78
70	0,1522	0,0275	455,81	450,98	451,86	439,54	21,38	460,92	36,22
80	0,1517	0,0280	456,19	451,44	450,95	439,51	22,14	461,65	36,82
90	0,1513	0,0289	456,65	451,77	452,93	439,52	22,94	462,46	37,70
100	0,1511	0,0291	456,79	451,86	452,56	439,55	23,12	462,68	37,96

Светодиоды зеленого (рис. 1в и рис. 4) цвета представлены двумя типами на основе гетероструктуры InGaN/AlGaIn/GaN с различными L<sub>dom</sub>. Материал подложки существенного значения в различии поведения характеристик не имеет, поэтому данные зависимости обобщены. Не отличаются от них и светодиоды с кристаллами CREE XBright и CREE XThin. Как и в случае с желтыми, у зеленых с L<sub>dom</sub> около 505 нм, совокупности токовых и температурных зависимостей будут определяющими в выборе типа диода и его режима при использовании в сигнальной аппаратуре. Особенно это касается автодорожных светофоров, где регламентирована именно такая L<sub>dom</sub> для зеленого сигнала.

Наименьшую зависимость колориметрических характеристик от прямого тока имеют светодиоды синего цвета на основе кристаллов InGaN/AlGaIn/GaN. Диаграммы на рис. 1г и 4 не нуждаются в комментариях.

Подробные данные исследований зависимостей колориметрических характеристик светодиодов различных цветов сведены в таблице 1.

### Электрический ток изменяет свет

Изменение интенсивности излучения под действием внешнего электрического поля, и соответственно, протекающего через *p-n*-переход тока, как отмечалось, вызывает изменение не только энергетики квантов, но и их количества, то есть интенсивности излучения. Интенсивность излучения, в свою очередь, рассматривается как совокупность всех излученных структурой квантов и может быть определена как интеграл всех элементарных энергий по объему, в котором распространяется это излучение. Зависимость результата этого интегрирования от интенсивности излучения, а значит, и величины тока через *p-n*-переход имеет достаточно характерный вид и известна как люмен-амперная характеристика или зависимость величины светового потока от тока через светодиод. Данная характеристика для большинства популярных типов кристаллов и структур подробно обсуждалась с использованием семейства температурных зависимостей [1]. Однако наряду с суммарным световым потоком, излучаемым кристаллом, имеет место эффект распределения интенсивности излучения по объему кристалла, который будет в некоторой степени зависеть

Приведенные значения являются типичными для большинства конструкций светодиодов и могут быть использованы для расчетов различных колориметрических величин и характеристик при проектировании устройств. Данные получены с помощью измерений в импульсном режиме, исключая нагрев кристалла и появление температурных зависимостей параметров во всем диапазоне токов, поэтому могут использоваться для любых конструкций светодиодов. Цвет заливки соответствует цвету свечения светодиодов.

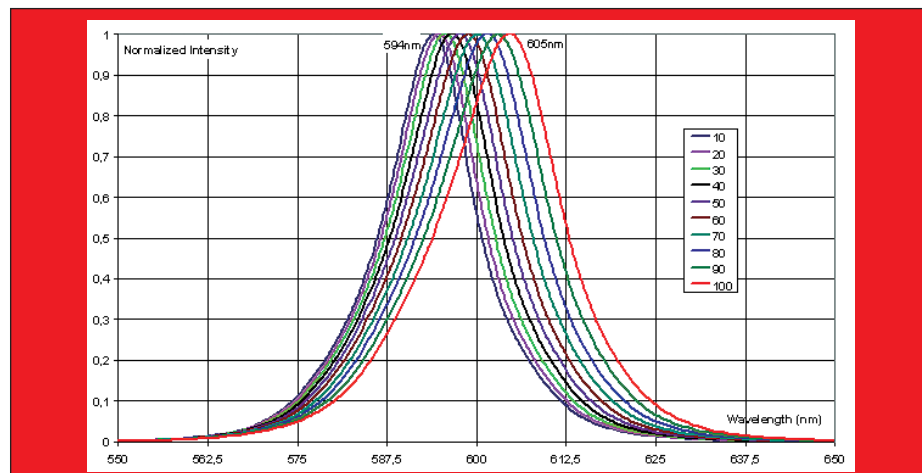


Рис. 3. Относительные спектральные характеристики излучения светодиодов желтого цвета. В верхней части графика указан разброс максимальной длины волны  $\lambda_{max}$  в зависимости от прямого тока (приведен на вставке в мА)

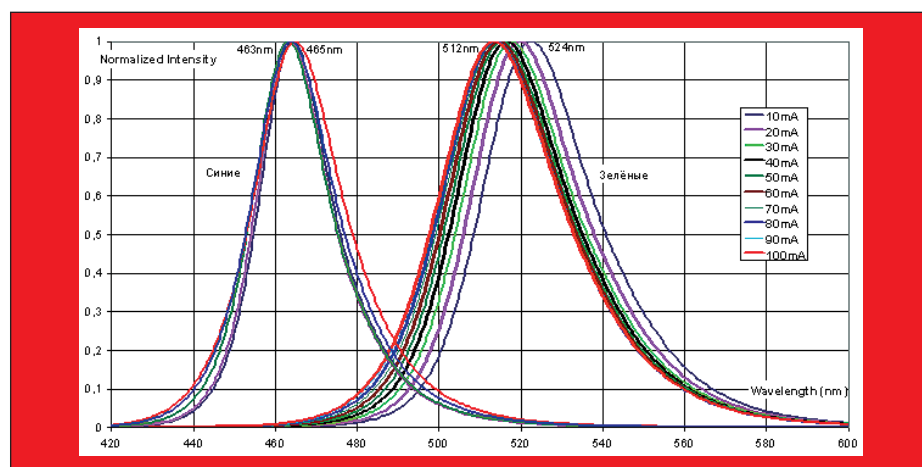


Рис. 4. Относительные спектральные характеристики излучения светодиодов зеленого и синего цвета на кристаллах с гетероструктурами InGaN/AlGaIn/GaN. В верхней части графика указан разброс максимальной длины волны  $\lambda_{max}$  в зависимости от прямого тока (приведен на вставке)

от величины приложенного напряжения, и как следствие, от соответствующего неравномерного распределения плотности проходящего тока, а в значительной — от времени наработки, как существенного фактора в процессе упорядочения центров излучения в материале *p-n*-перехода. Этот эффект также связан с конструкцией омических контактов кристалла, которая определяет пути протекания тока и функцию его растекания по объему. В работе [2] описана картина изменения распределения плотности тока вблизи омических контактов в зависимости от его величины и соответствующая ей система изменения положения центров излучения в процессе деградации светодиода. В случае с исследованием деградации светового потока кристалла наибольший интерес представляет изменение характера его перераспределения по объему излучения в зависимости от величины проходящего тока и времени наработки. Для наглядной демонстрации описанных зависимостей, которые в большинстве типов кристаллов имеют идентичный вид, ниже приводится сравнительный

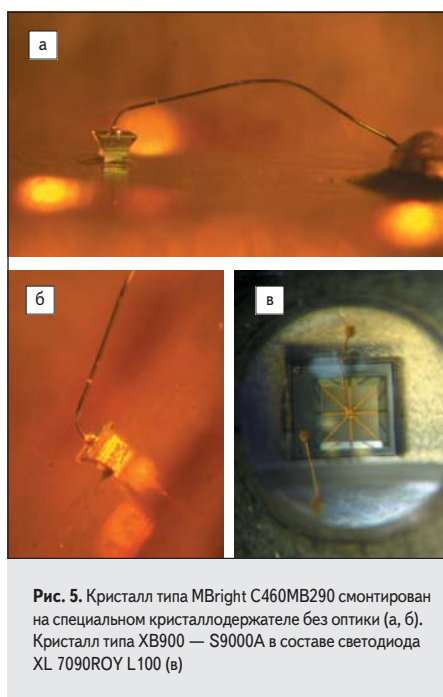


Рис. 5. Кристалл типа MBright C460MB290 смонтирован на специальном кристаллодержателе без оптики (а, б). Кристалл типа XB900 — S9000A в составе светодиода XL 7090ROY L100 (в)

анализ характеристик у двух типов кристаллов на основе InGaN/AlGaIn/GaN синего цвета свечения фирмы CREE — MBright и XB900, например S9000A (рис. 5).

Данные кристаллы выращены на подложке SiC и имеют идентичную конструкцию, но разную площадь структуры и небольшие отличия в конфигурации омических контактов. Несмотря на десятикратное отличие по площади, рекомендованная производителем плотность тока у них приблизительно одинакова (40–50 А/см<sup>2</sup>), что позволяет предположить и соответствующее сходство в функции распределения плотности тока. На основе кристаллов CREE MBright, в том числе известными фирмами Osram, Cotco, Kingbright и Sharp, производятся широко распространенные во всем мире светодиоды в стандартных круглых конструкциях диаметром 5 мм, или с овальной оптикой того же размера и рабочим током 20 мА. В России эти кристаллы используются фирмой «Корвет — Лайтс» в устройствах с особой конструкцией кристаллодержателя, позволяющей развивать плотность тока до 100 А/см<sup>2</sup> без потери ресурса наработки и изменения любых других характеристик кристалла [3]. Кристаллы S9000A являются достаточно недавней и перспективной разработкой фирмы CREE — продолжением серии XBright, предназначенной для посадки на эвтектику, и применяются разработчиком в светодиодах типа Xlamp 7090. Кристаллы S9000A исследовались в составе светодиодов XL 7090ROY L100 (рис. 5в) ввиду практического отсутствия у них оптики и поэтому весьма незначительного ее влияния на диаграмму пространственного излучения кристалла. Соответственно, все приведенные зависимости можно использовать для оценки параметров не только указанных кристаллов, но и светодиодов на их основе. Характеристики кристаллов MBright изучались также без оптической системы, для чего образцы были смонтированы на специальные плоские кристаллодержатели (рис. 5а–б) без первичной оптики в виде параболической лунки. Все сказанное поясняет выбор именно этих кристаллов для описания и предложенной методики их исследования. Для начала стоит рассмотреть группу диаграмм на рис. 6, на которых показана динамика изменения функций углового распределения силы света в зависимости от прямого тока. Диаграммы представлены в абсолютных единицах силы света, где нагляднее понятен смысл сказанного о количественной стороне изменения светового потока, а на рис. 7 — в относительных, поясняющих уже непосредственно относительное поведение силы света в различных точках диаграммы излучения, от которой легче перейти к световому потоку. Приведенные на рис. 7 относительные диаграммы составлены из функций распределения силы света, измеренных в 12 плоскостях при каждом значении проходящего тока, указанного на сноске диаграмм, и являются

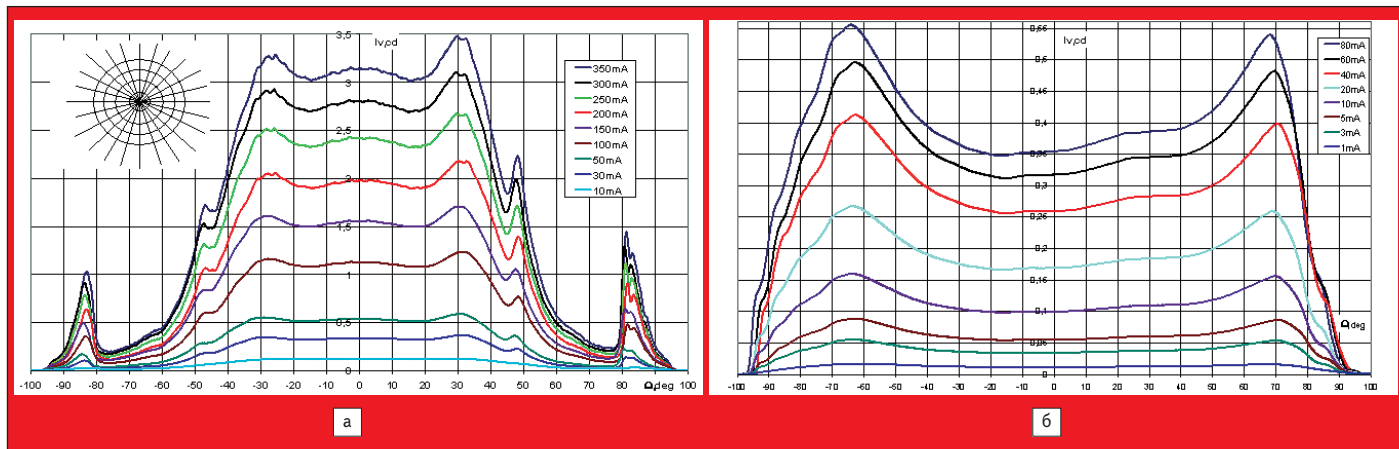


Рис. 6. Абсолютные характеристики углового распределения силы света светодиодов типа XL 7090ROY L 100 (а) и кристаллов C460MB290 (б) компании CREE при различных токах через кристалл. Составлены по результатам измерения пространственного распределения в 12 плоскостях диаграммы излучения. Схема измерения диаграмм сечений приведена на вставке рис. 6а, слева сверху.

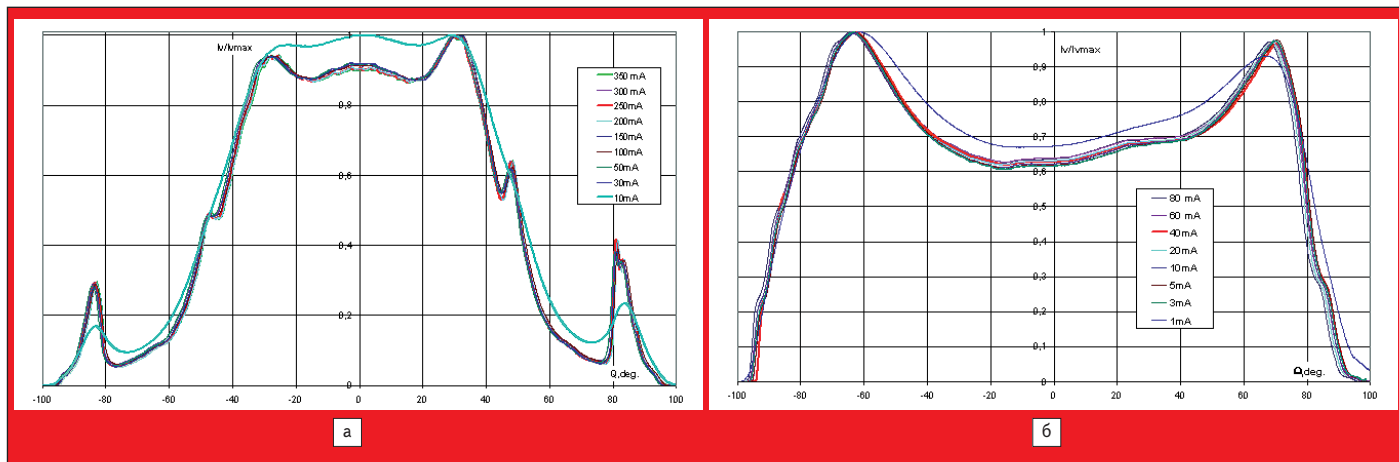


Рис. 7. Относительные характеристики углового распределения силы света светодиодов типа XL 7090ROY L 100 (а) и кристаллов C460MB290 (б) компании CREE при различных токах через кристалл. Составлены на основе диаграмм, показанных на рис. 6.

усредненным результатом сложения этих функций. Они показывают, насколько пропорционально при изменении плотности тока через кристалл изменяется сила света во всех точках ее объемного распределения. Однако наибольший интерес представляет распределение светового потока как энергетический показатель работы излучающей структуры (рис. 8). На диаграммах рис. 7 видно, что в широких пределах изменения плотности тока у обоих вариантов конструкции кристалла сохраняется высокая линейность изменения силы света по всему объему кристалла (относительные диаграммы на всех токах практически совпадают, а их отличия можно хорошо рассмотреть только при расчетах, представленных в виде рис. 8), свидетельствующая о хорошем растекании тока по его объему и о равномерности распределения легирующих примесей в материале кристалла. Кроме того, на рис. 7 можно заметить, что при определенной минимальной плотности тока распределение перестает быть пропорциональным (кривые, соответствующие токам 10 мА на рис. 7а и 1 мА на рис. 7б).

Это объясняется уходом режима светодиода с линейного участка вольт-амперной характеристики и работой с неполноценной степенью излучения вследствие недостаточности величины внешнего электрического поля. На этом участке люмен-амперная характеристика принимает вид, приближенный к экспоненте.

Рис. 8 показывает распределение светового потока по углу излучения в зависимости от прямого тока. Диаграмма рассчитана на основе данных, проиллюстрированных на рис. 6–7 и является плоской проекцией объемной диаграммы излучения кристалла. Из рис. 8 видно, что центральная область кристалла стабильна и значение потока изменяется пропорционально изменению тока скорее всего из-за меньшего его сосредоточения в центре диаграммы и близости омического контакта, способствующего более равномерному растеканию тока, что совсем нельзя сказать про области, удаленные от центра. Здесь, несмотря на малую величину силы света, значение светового потока существенно больше (из-за большего угла излучения) в одном и том же секторе, ограниченном таким же

плоским углом, что и в центре, поэтому, соответственно, все соотношения приобретают более резкий характер. Значительный вклад в перераспределение светового потока в этих областях вносят грани кристалла — вертикальные и горизонтальные. Их влияние на ход лучей усиливает эффект нелинейности плотности излучения еще и из-за их специфического расположения в трапецевидной форме кристаллов. Поэтому на рис. 8 можно заметить, что наибольшие изменения светового потока происходят именно на участках, соответствующих расположению излучения от граней (приблизительно +80°: изломы хорошо видны на диаграммах рис. 6–7). Практическое значение этого эффекта заключается в реальном изменении угловых характеристик излучения светодиода, которые гарантированы производителем при определенном токе через кристалл и их значение всегда считалось неизменным во всем диапазоне рабочих токов и при любой степени деградации (времени наработки). Это видно из рис. 9, где представлены зависимости угла излучения по уровням силы света от времени наработки

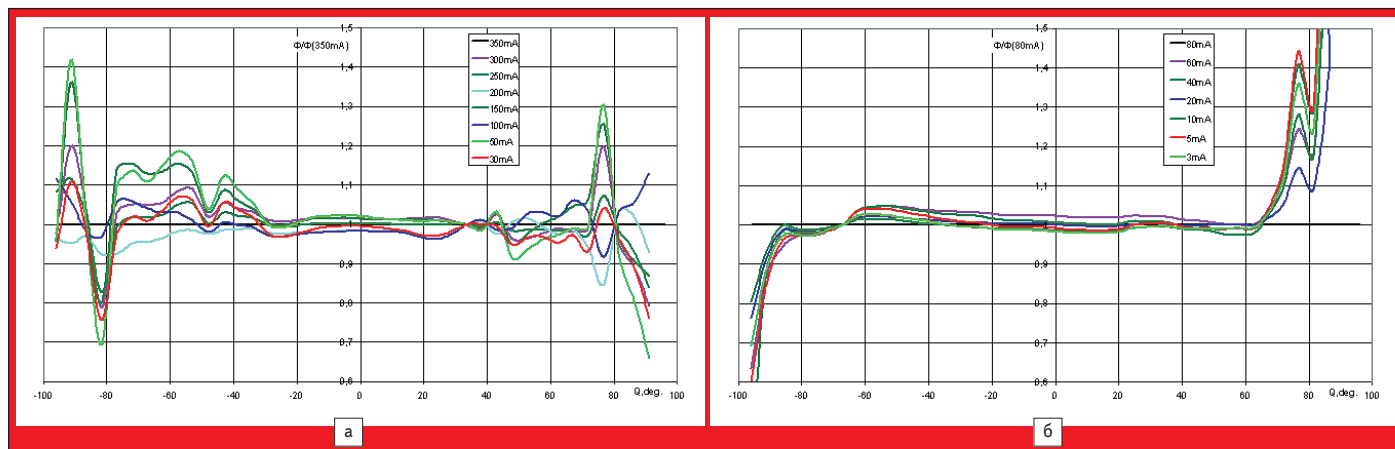


Рис. 8. Динамика изменения распределения светового потока в объеме кристалла в зависимости от плотности тока (прямого проходящего тока). Диаграмма рассчитана относительно распределения на максимальном токе (прямая линия черного цвета) для кристаллов S9000A (а) и для кристаллов MBright C460MB290 (б)

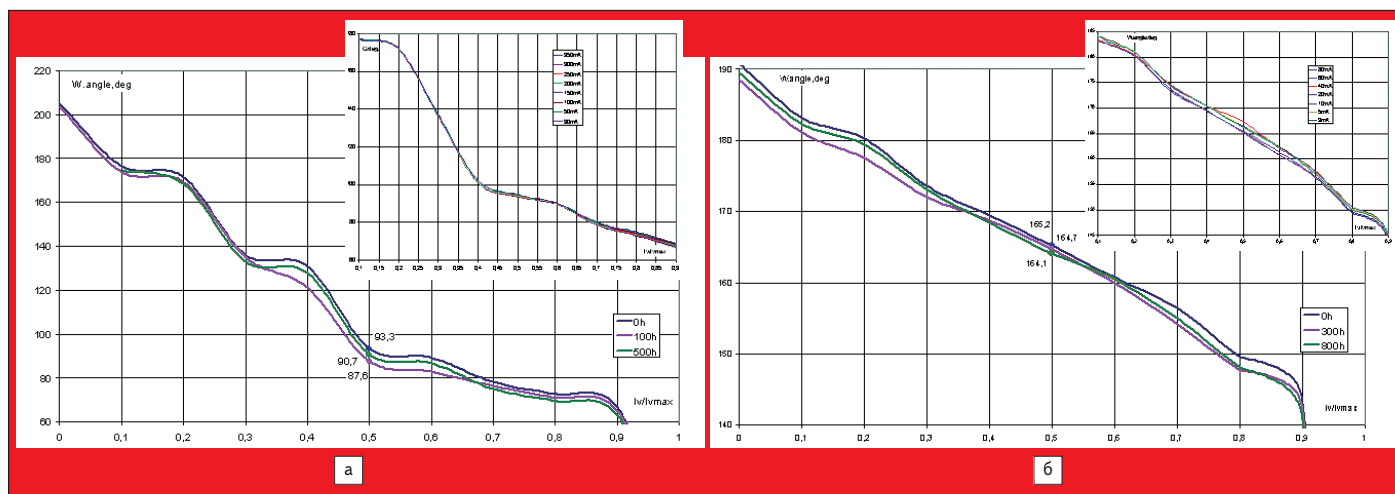


Рис. 9. Угловое распределение силы света в зависимости от времени наработки и тока через кристалл (вставка на диаграммах), XL 7090ROY L100 (а) и кристаллов C460MB290 (б)

и величины прямого тока. Особенно заметен этот эффект при рассмотрении светодиодов белого цвета с люминофором, определенным образом покрывающем поверхность кристалла. Перераспределение светового потока первичного излучения (от кристалла синего цвета) приведет к существенному перераспределению преобразованного люминофором потока с изменением первоначальных угловых характеристик и, что не менее важно, колориметрических параметров излучения белого цвета. Последнее объясняется особенностями распределения интенсивности излучения в конкретных типах кристаллов при нанесении люминофора: толщина нанесения может быть различной на разных участках поверхности кристалла. Увеличение интенсивности в какой-либо области поверхности с более тонким слоем приведет к увеличению весовой доли спектра первичного излучения и, в результате, к изменению координат цветности или цветовой температуры излучения, преобразованного люминофором. Это напрямую касается типов описываемых кристаллов, используемых в качестве излучателей в производстве белых

светодиодов, например, XL 7090WHL L100 фирмы CREE. Следует также помнить, что небольшое изменение угловых характеристик излучения кристалла, показанное на рис. 9, значительно увеличится «с помощью» оптики светодиода, в котором работает этот кристалл. Усиление эффекта будет тем больше, чем большей оптической силой обладает система светодиода.

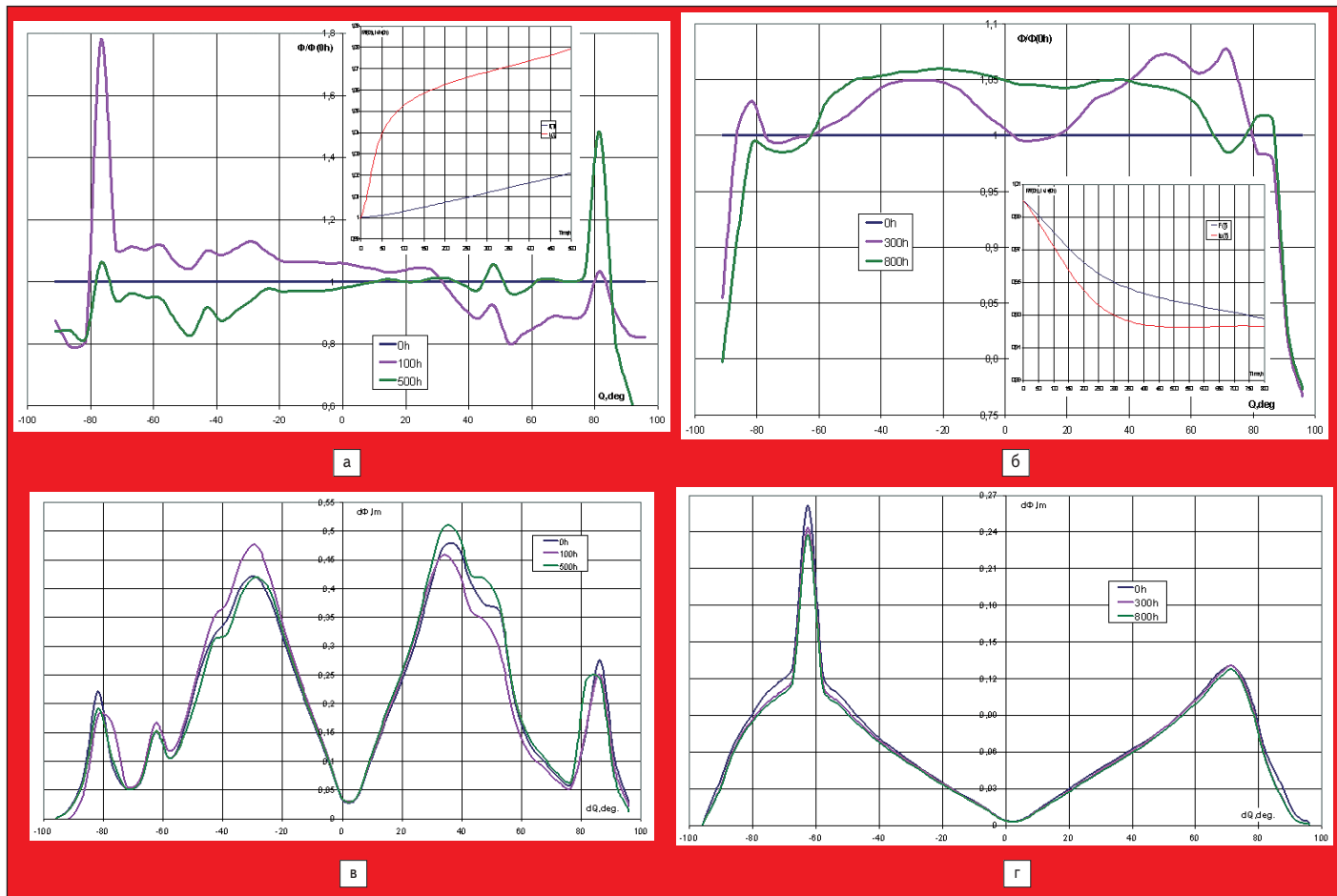
Однако на ход описанных характеристик будут также существенно влиять изменения, вызванные деградацией параметров в ходе наработки светодиода. На рис. 10 представлены уже знакомые относительные характеристики объемного распределения светового потока, только зависящие от времени. Расчет этих зависимостей позволяет в совокупности с приведенными на рис. 8 построить многомерные модели поведения светового потока светодиода или кристалла. Если считать, что характер изменения светового потока от прямого тока останется таким же (как показано на рис. 8) на всех отрезках времени наработки, то с помощью описанной методики исследования и приведенных здесь данных и диаграмм можно не только спрогнозировать

Таблица 2. Некоторые параметры светодиодов XL 7090ROY L100 и кинетика из изменения от времени наработки

Параметр	Время T, ч			Данные спецификации
	0	100	500	
Макс. сила света Iv, кд	3,48	3,66	3,76	—
Угол по уровню 0,5Iv, град.	95,3	87,6	90,7	100
Световой поток, лм	8,34	8,37	8,51	—
Мощность излучения, мВт	126,4	127,3	128,9	до 255
Динамич.длина волны, нм	467,83	467,67	467,38	465

поведение любого светотехнического или иного параметра светодиода при различных токах, но и предположить их изменение со временем его наработки. Например, хорошо видно, что светодиод XL 7090ROY L100 изначально имеет угол излучения по уровню 0,5Iv — немногим более 95°, но уже через 100 часов (4,5 суток) наработки этот параметр уменьшается до 88°, что еще больше не соответствует заявленному в спецификации данным (100°), хотя осевая сила света растет (табл. 2).

Кроме того, можно заметить, что деградационная характеристика (зависимость значения величины от времени наработки —



**Рис. 10.** Динамика относительного изменения распределения светового потока в объеме кристалла в зависимости от времени наработки и соответствующие плоские проекции пространственного распределения светового потока в абсолютных единицах в зависимости от времени наработки (шаг измерения светового потока — телесный угол, образованный плоским в  $3,2^\circ$ , время наработки указано на сносках) кристаллов XL 7090ROY L100 (а, б) и С460MB290 (в, г).  
На вставках приведены деградационные характеристики светового потока и максимальной силы света

вставки на диаграммах рис. 10) светового потока (темная линия) существенно отличается от деградационной характеристики максимальной силы света (красная линия) в части их крутизны и тенденции ухода, а наличие у этого светодиода оптики, хоть и элементарной, объясняет факт значительного роста силы света на фоне практически не изменяющегося светового потока именно из-за описанного выше его перераспределения, а не изменения самого значения. По этому примеру можно судить о том, насколько возможно расхождение этих характеристик при наличии у светодиода более серьезной оптической системы. Это предположение также подтверждает и подобная характеристика кристалла С460MB290, у которого деградационные зависимости указанных величин практически одинаковы (рис. 10б). Кривые на графиках (рис. 10б, 10г) позволяют оценить количественную характеристику изменения светового потока в различных частях диаграммы пространственного распределения излучения непосредственно в абсолютных единицах. Эти характеристики получены расчетом светового потока в пределах небольших телесных углов, составляющих весь

сектор сферы, в котором происходит распределение плотности светового потока. Можно заметить, что в течение указанного времени наработки происходит постоянное его перераспределение, которое на данном временном отрезке может и не иметь устойчивой тенденции направления изменения: на рис. 10б значительная часть доли потока за короткое время перераспределяется между областями  $-30^\circ$  и  $+40^\circ$  и обратно, а на графике 10а хорошо видно, что крайние области диаграммы излучения (приблизительно  $-80^\circ$  и  $+80^\circ$ ) вообще меняют направление перераспределения на противоположное, и на этих диаграммах есть участки, где световой поток изменит свое значение более чем в 1,75 раза. Очевидно, что это существенная величина. Однако суммарный световой поток всего излучения светодиода на фоне этих манипуляций остается неизменным (увеличивается всего на 1–2%), о чем свидетельствует темная линия на вставке рис. 10а. Характеристики кристалла С460MB290, показанные на рис. 10в–г также имеют описанные особенности, но отличаются меньшими амплитудами отношений результатов перераспределения. Это объясняется, прежде

всего, уже упоминавшимся ранее более выгодным условиям растекания тока по площади кристалла и сопутствующим его малому геометрическому размеру отсутствием проблем с внутренними механическими напряжениями кристаллической решетки монокристалла.

### Старость — в радость

Перераспределение светового потока в объеме излучающей структуры считается одним из многих закономерных процессов старения или деградации кристалла или светодиода в целом. Здесь понятие «деградация» может означать отнюдь не изменение характеристик обязательно в худшую сторону. Скорее всего, это наработка светодиода при определенных условиях с изменением параметров. Описанные выше исследования дают представление о характере этих изменений в начальный и довольно короткий период (до 1000 часов), по сравнению с традиционным периодом времени, указываемом в спецификациях (100 000 часов). Однако как показали более масштабные и продолжительные исследования деградации параметров

светодиодов, этот период является очень важным и одним из самых показательных при определении дальнейшего развития изменения характеристик. Например, стало совершенно очевидно, что приведенные здесь в примере светодиоды XL 7090ROY L100 фирмы CREE в свое время не проходили на производстве этап ускоренного старения, применяемый большинством известных производителей светодиодов такого класса в качестве необходимой технологической операции в производственной цепочке. Данная операция может быть реализована несколькими способами, которые отличаются эффективностью, но она обязательна для выполнения, чтобы успешно прошедшие ее светодиоды действительно могли реализовать наработку в течение 100 000 часов с гарантируемым минимальным изменением параметров. Только эти светодиоды могут использоваться в аппаратуре высокой степени надежности, такой как железнодорожные

и автодорожные светофоры, полноцветные экраны, военная аппаратура и так далее, поэтому и разработчики, и заказчики обращают особое внимание на этот момент производства светодиодов.

Принудительное ускоренное старение выводит потенциально качественный светодиод на участок работы со стабильными характеристиками и в то же время катализирует деградиационные процессы в тех светодиодах, чьи неисправности могли бы при штатном использовании выявиться только через некоторое время, когда светодиод был бы уже помещен в аппаратуру. Соответственно, отобранные после указанной операции из общего числа такие светодиоды не попадут к заказчику и не вызовут своим отказом неработоспособность аппаратуры. Исходя из этого, предсказуемость поведения параметров светодиодов, взятых для описанного исследования, в процессе дальнейшей работы будет низкой. Однако это не указывает на их плохое

качество и невозможность стабильной и длительной работы. Истинность этого предположения подтвердит время. ■

### Литература

1. Никифоров С. Г. Температура в жизни и работе светодиодов // Компоненты и технологии. 2005. № 9. 2006. № 1.
2. Бочкарева Н. И., Ефремов А. А., Ребане Ю. Т., Горбунов Р. И., Клочков А. В., Шретер Ю. Г. Деградиация инжекции носителей заряда и деградиация голубых светодиодов // Физика и техника полупроводников. 2006. Т. 40, вып. 6.
3. Агафонов Д. Р., Аникин П. П., Никифоров С. Г. Вопросы конструирования и производства светозлучающих диодов и систем на их основе // Светотехника. 2002. № 6.
4. Официальные рекомендации Международной комиссии по освещению (МКО). Публикация МКО № 2.2(ТС-1.6). Цвета световых сигналов. 1975.