

Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высокого качества

к.т.н. - Сергей Никифоров

Аннотация

Результатом интенсивного развития технологий в области производства оптоэлектронных приборов на основе полупроводниковых светоизлучающих кристаллов, стало широкое использование этих приборов в системах отображения информации и световой сигнализации. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и получения любого оттенка в широком динамическом диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве источников света для этих устройств.

Реализация таких возможностей в этой области применения светодиодов достигается решением ряда технических задач, возникающих в процессе разработки конструкции диода. Анализ проблем конструкций светодиодов и кристаллов, оценке результатов собственных исследований характеристик и прогнозу тенденций повышения качества светодиодов посвящена данная статья.

1. Полупроводниковые источники света

Задача высечь огонь из чего бы то ни было, сопутствовала человечеству всю историю его существования. Однако, на определённом этапе, огонь, полученный с помощью кремния, разделился на большое количество функций, одной из которых является его важная составляющая – свет. По-разному решалась эта задача в прежние века, но в этой статье речь пойдёт о самом современном способе получения света из камня. Основой для построения современных полупроводниковых источников света служит излучающий кванты света $p-n$ – переход. Существует множество вариантов создания $p-n$ – перехода в полупроводнике, но мы остановимся только на тех структурах, которые способны излучать кванты электромагнитного излучения при протекании через них электрического тока.

Это – гетероструктуры с широкозонными $p-n$ – переходами, у которых ширина запрещённой зоны более 1,9 эВ. В настоящее время созданы структуры, способные излучать во всём видимом диапазоне, ближнем ИК и ультрафиолете. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и получения любого оттенка в широком динамическом диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве различных источников света.

2. Светодиоды

Светодиод - это полупроводниковый прибор, преобразующий энергию электрического тока в световую, основой которого является излучающий кристалл. Излучение светодиода занимает достаточно узкую полосу (до 25-30 нм) шкалы спектрального распределения плотности энергетической яркости и поэтому носит характер квазимонохроматического излучения.

На основе вышеперечисленных полупроводниковых кристаллов с излучающими $p-n$ – переходами создано огромное множество различных светоизлучающих диодов. Конструкция светодиода определяет направление, пространственное распределение, интенсивность излучения, электрические, тепловые, энергетические и другие характеристики излучения от полупроводникового кристалла. И, конечно, взаимное влияние всех этих параметров друг на друга.

Детальное изучение этой информации о светодиодах от различных производителей, различных конструкций и назначения, сравнение её с полученной в условиях лаборатории и позволило сделать некоторые важные выводы о качестве и областях применения светодиодов.

В последнее время, светоизлучающие диоды всё больше претендуют на использование их в освещении, художественной подсветке, ответственной сигнальной технике. Всё это стало возможным благодаря достаточно быстрому росту энергетических показателей, надёжности и долговечности этих квазимонохроматических источников излучения. Малое потребление электрической энергии, лёгкость формирования диаграммы направленности с помощью различной оптики, простота управления и самое важное – специфическое восприятие излучения глазом делают светодиоды незаменимыми для создания полноцветных экранов, вывесок и других средств представления информации в виде динамического изображения.

3. Теория светотехнических и электрических характеристик современных светодиодов и её связь со спецификациями производителей

Angular distribution of radiation

444.113

0.699

0.11

0.09

0.08

0.06

0.04

0.02

0

10

20

30

40

50

60

70

80

90

100

110

120

130

140

150

160

170

180

190

200

210

220

230

240

250

260

270

280

290

300

310

320

330

340

350

360

$I(\theta)$

$\psi(\Omega)$

θ, Ω

I_{max}

Подавляющее большинство простых математических пересчётов этих единиц, которыми пользуются потребители светодиодной продукции, оказываются абсолютно неверными и приводят к большой ошибке в проектировании энергетических характеристик устройств на

светодиодах. Особенно это заметно при попытках пересчёта несимметричных диаграмм направленности излучения (например, светодиодов с овальной оптикой) и индикатрис узконаправленных светодиодов. Поэтому стоит остановиться на некоторых методах определения светового потока и связи его с другими фотометрическими единицами, потому как, лишь только непосредственным измерением этой величины можно с большой точностью получить её значение.

Методы определения светового потока на основе малых сферических интеграторов (радиус сферы составляет порядка 300-400 мм) широко используются в электронной промышленности. При этом светодиод располагается во входном окне сферы. Однако при измерениях светодиодов с разным пространственным распределением силы излучения можно получить большие ошибки, т.к. геометрия распределения освещенности на внутренней поверхности интегратора будет различной.

Классический подход к измерениям полного светового потока с помощью сферического интегратора – это размещение источника излучения в центре сферы. Но даже в этом случае связь с эталоном люмена, погрешности, связанные с неравномерностью спектральных и зонных характеристик внутренней поверхности сферы, требуют особого внимания. Именно поэтому наиболее перспективным с точки зрения точности и информативности является метод пространственного сканирования силы света - гониофотометрический метод.

Используемые для этих целей приборы – гониометр с достаточным угловым разрешением и фотометрическая головка с известным коэффициентом преобразования. Суть этого метода основана на пошаговой фиксации значений силы света светодиода при его повороте на известный угол. Уменьшение погрешности измерений и получение наиболее достоверного углового распределения возможно при минимальном значении шага угла поворота светодиода относительно фотометра (или наоборот). Современные гониофотометрические установки имеют шаг 3...10 угловых минут. Одновременно выполняются измерения осевой силы света и её пространственное распределение. На основании этих данных рассчитывается световой поток. Получение светового потока светодиода F с пространственным распределением силы света произвольной формы определяется с помощью индикатрис излучения большого числа плоскостей ($nI_v(\theta)$ при $n \rightarrow \infty$) и последующим вычислением среднего значения F , [2].

$F_n := \int_{\theta_n}^{\theta_{n+1}} I_v(\theta_n) d\theta_n$	$F_{\Sigma} := \frac{F_1 + \dots + F_n}{n}$
Формула [1]	Формула [2]

Распределение светового потока внутри диаграммы направленности позволяет судить о том, какая его часть попадёт к наблюдателю в зависимости от угла его зрения. Следует напомнить, что МКО 1931 г. регламентирует т. н. "стандартного колориметрического наблюдателя", угол зрения которого определён в 1 град (рис.2) . Это обстоятельство учитывается при выборе этого параметра светоизлучающего диода в зависимости от его назначения. Однако, часто пользуются лишь индикатрисой излучения, что не всегда верно при расчётах восприятия.



Применительно к экрану, табло или бегущей строке, как к источнику излучения совокупности светодиодов, площадью которого нельзя пренебречь по отношению к расстоянию L до наблюдателя – не выполняется закон «обратных квадратов» (рис. 3) – используется другая единица, с помощью которой характеризуется энергетика излучения такого протяжённого источника – яркость Y [кд/м²].

$I_r = f\left(\frac{R}{L^2}\right)$	$Y_{max} = \frac{I_{vmax}}{S_d}$
Формула [3]	Формула [4]

Эффективность излучателя света характеризуется отношением светового потока (Im) к потребляемой электрической мощности (W). Эта величина, называемая светоотдачей, для светодиодов из материалов типа $A^{III}B^{IV}$ стала больше, чем у ламп накаливания во всех основных цветах видимого диапазона. Современные светодиоды имеют эффективность, достигающую 20-30 лм/Вт, а КПД колеблется от 9-16 % в приборах на основе нитрида галлия и его твердых растворов GaN , $In_xGa_{1-x}N$, $Al_xGa_{1-x}N$, до 25-55% у светодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов $In_yAl_xGa_{1-x-y}P$.

Помимо энергетических, светодиоды характеризуются колориметрическими характеристиками. Знание этих параметров особенно важно при формировании правильной цветопередачи изображения в любом устройстве отображения информации, при использовании в светосигнальной технике, при проектировании оттенков подсветки в архитектуре и т. д.

МКО 1931г. установила трёхкоординатную XYZ – систему обозначения цвета любого источника излучения (рис.3). Как уже отмечалось, светодиоды являются достаточно узкополосными (квазимонохроматическими) излучателями, полуширина спектров которых составляет всего 15 – 30 nm, что соответствует средней тепловой энергии электронов, поэтому координаты цветности их излучения лежат практически на линии «чистых» цветов локуса МКО 31 г.

Однако, имеется и более простая единица, характеризующая цвет – доминирующая длина волны λ_{dom} , получаемая как результат пересечения прямой, проходящей через точку равноэнергетического источника типа «Е» и точку с координатами цветности данного светодиода и локуса МКО – 1931. Именно её указывают в технических характеристиках на светодиоды монохроматического излучения. Лишь, отдельные фирмы, и японская фирма “Nichia” в их числе, указывают координаты цветности, что, по сути, правильнее.

Однако, для устройств отображения информации, где важность цветопередачи изображения имеет очень высокий статус, этих характеристик зачастую, оказывается недостаточно. Поэтому разработчики этих устройств пользуются как правило, спектральными характеристиками светодиодов, преобразования которых могут позволить получить ряд параметров спектрального распределения излучения, позволяющих детально оценить возможность использования конкретного светодиода в формировании необходимого оттенка или гаммы цветов. Спектр излучения характеризуется, помимо указанных, такими характеристиками, как центральная λ_c и максимальная λ_{max} длины волн, полуширина спектра $\lambda_{1/2}$, интегральный коэффициент K [Lm/Wopt] [5].

$K := 683 \frac{Im}{W} \frac{\int_{780}^{360} E(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{780}^{360} E(\lambda) d\lambda}$
Формула [5]

Здесь $E(\lambda)$ - относительное спектральное распределение светодиода, $V(\lambda)$ - относительная спектральная световая эффективность.

Так, например, для получения высококачественного изображения на светодиодном экране, работающем по схеме формирования белого из 3-х основных цветов – RGB, необходимо, чтобы полуширина спектра источника каждого цвета была минимальна, что обеспечит высокую чистоту цвета поля изображения.

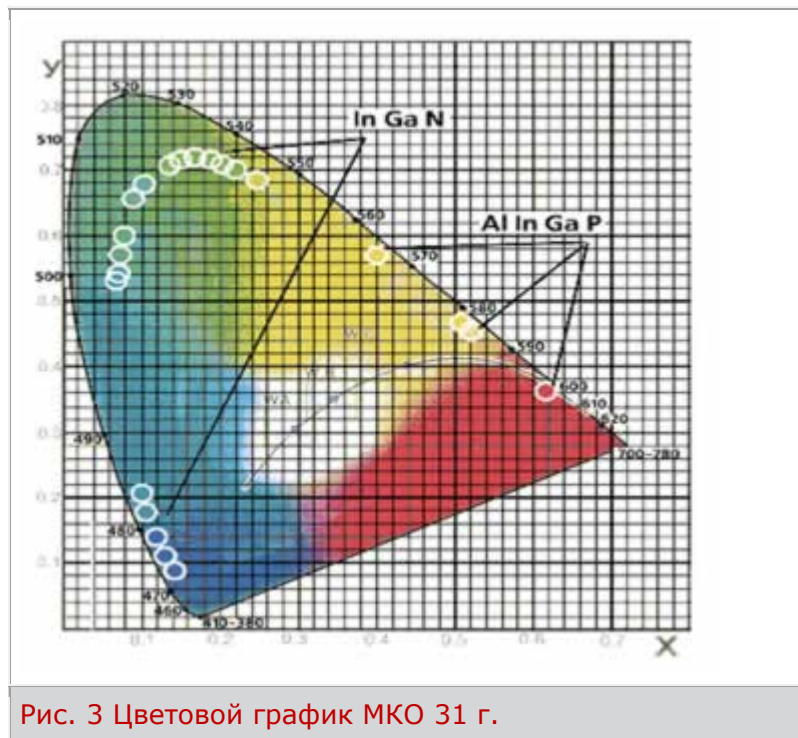


Рис. 3 Цветовой график МКО 31 г.

Не менее важными, также, являются электрические характеристики светоизлучающих диодов. Это прямые и обратные Вольт-Амперные характеристики (рис. 4-6), зависимости прямого напряжения U_f и прямого тока I_f от температуры окружающей среды, люмен-Амперные характеристики (зависимости интенсивности излучения от прямого тока через светодиод). По этим параметрам можно определить необходимые характеристики источников питания проектируемых устройств и рассчитать режимы оконечных устройств коммутации, нагрузкой которых будут используемые светодиоды.

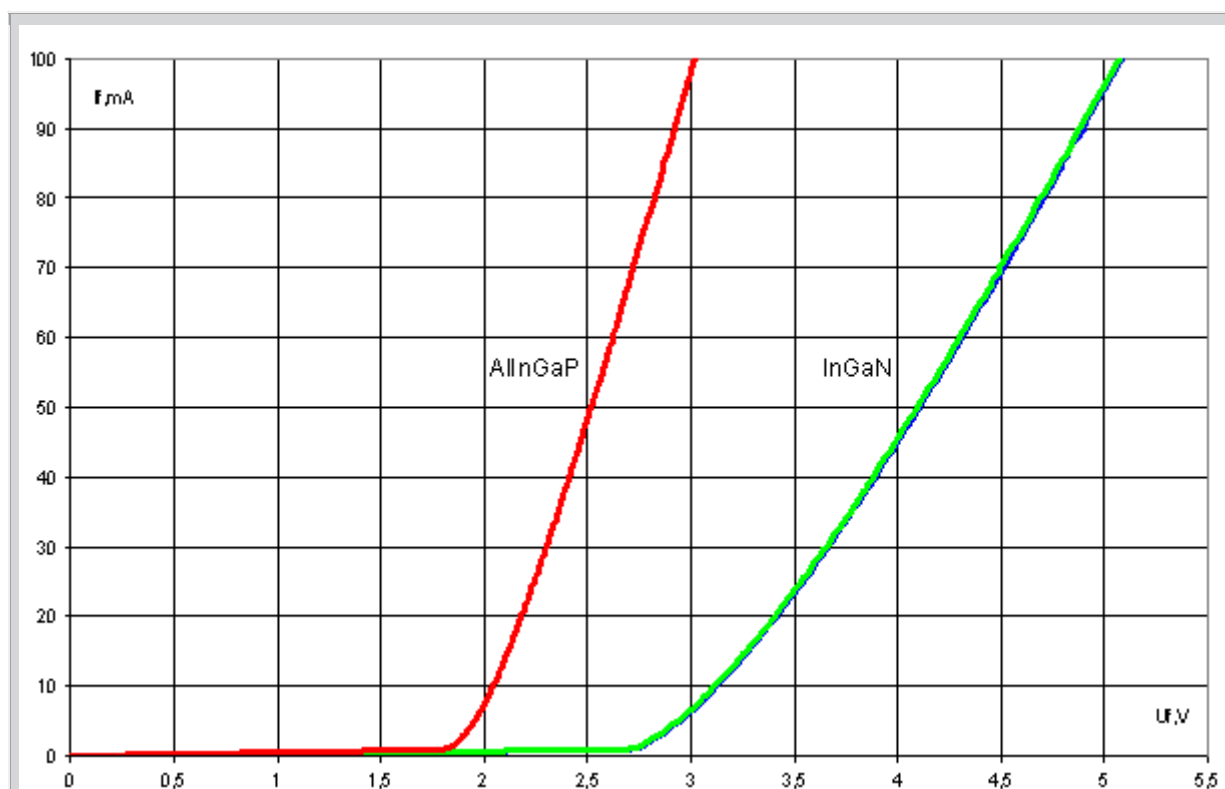


Рис. 4 Типичные прямые Вольт-Амперные характеристики светодиодов

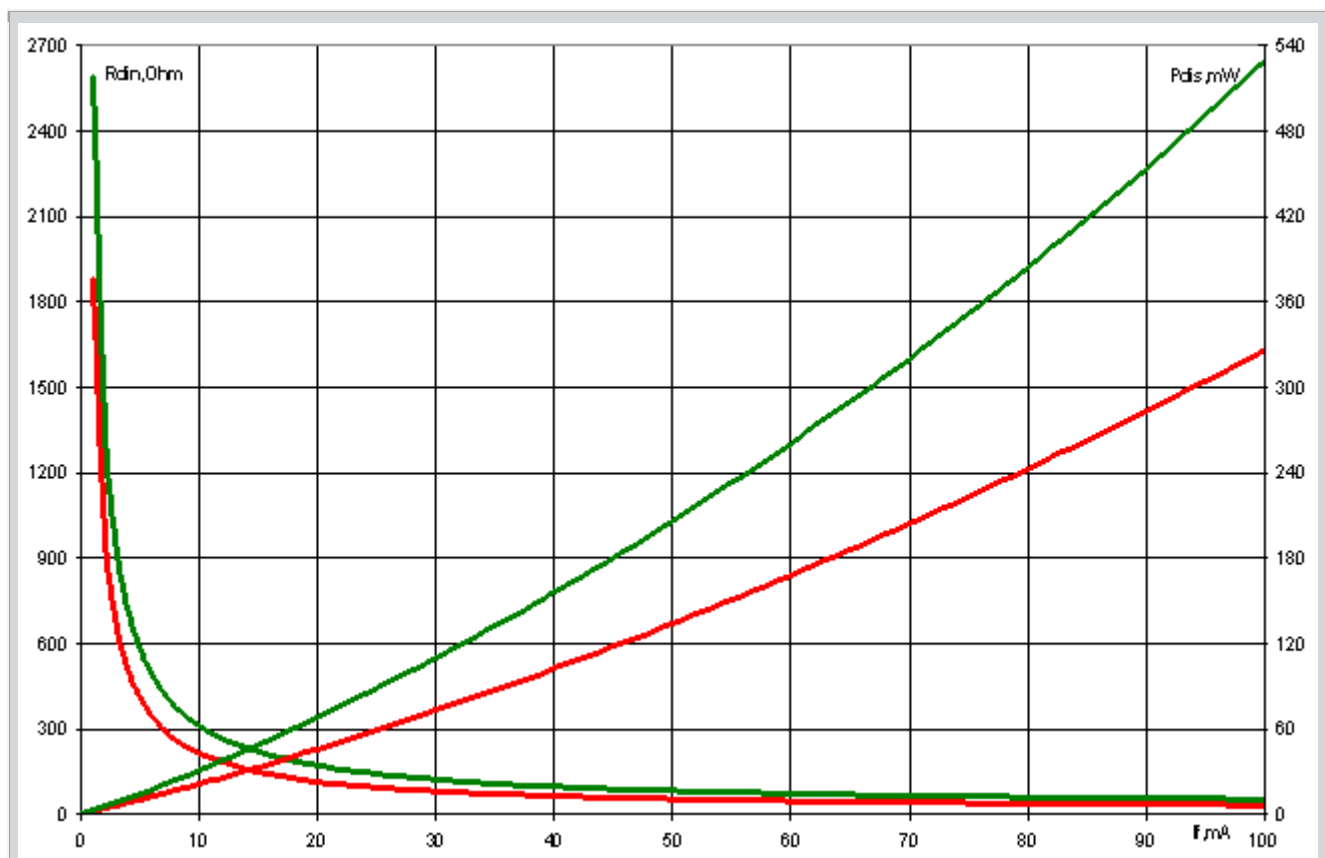


Рис. 5 Зависимость потребляемой мощности P_{dis} от прямого тока I_f и динамическое сопротивление R_{din} светодиодов. Зелёным цветом – на основе InGaN/AlGaIn/GaN , красным – на основе AlInGaP/GaP

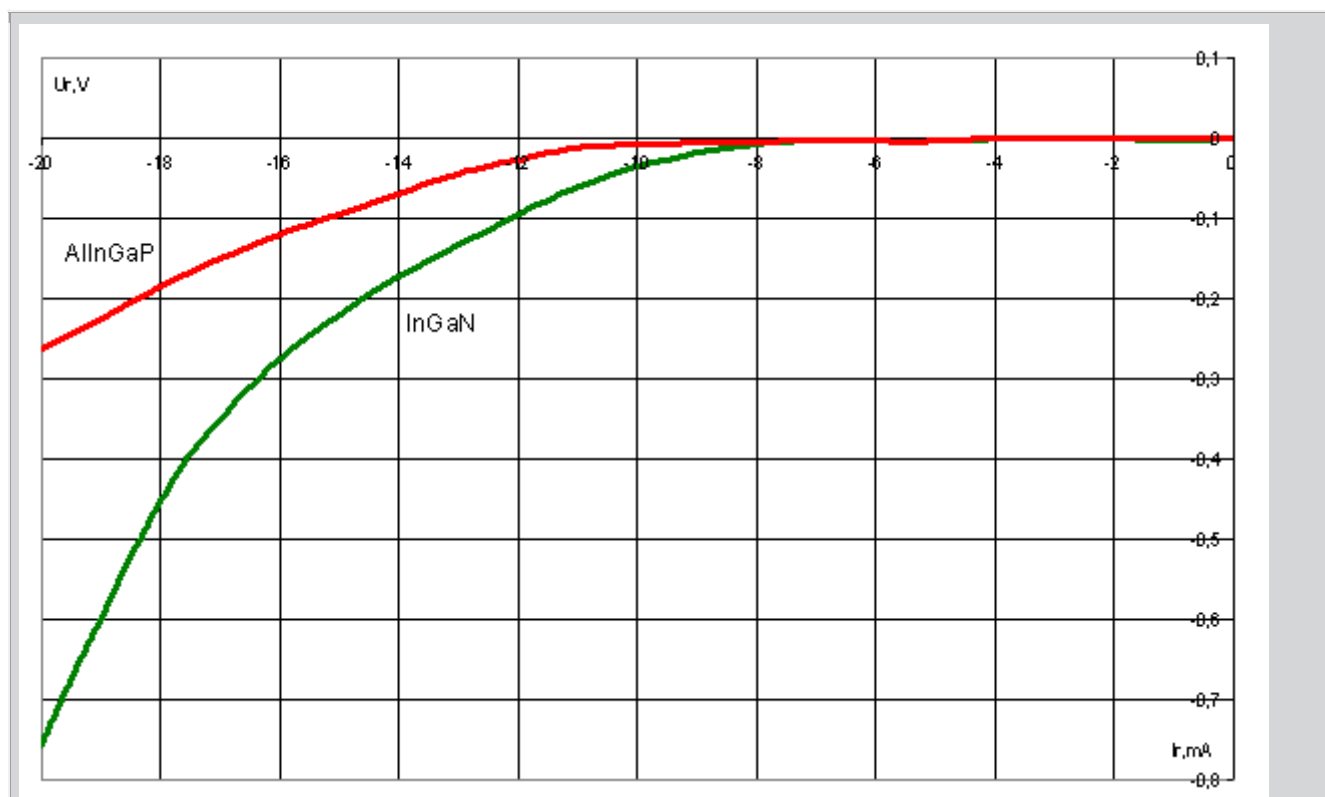


Рис. 6 Типичные обратные Вольт-Амперные характеристики светодиодов

Следует отметить, что все описанные выше характеристики светоизлучающих диодов находятся в непосредственной зависимости друг от друга, поэтому, как правило, лишь их совокупность позволяет правильно судить о тех или иных параметрах светодиода. Однако, наиболее точно определить не только соответствие заявленным производителем параметров светодиода, но и

его качество, долговечность, можно лишь проведя комплекс измерений и расчётов его характеристик.

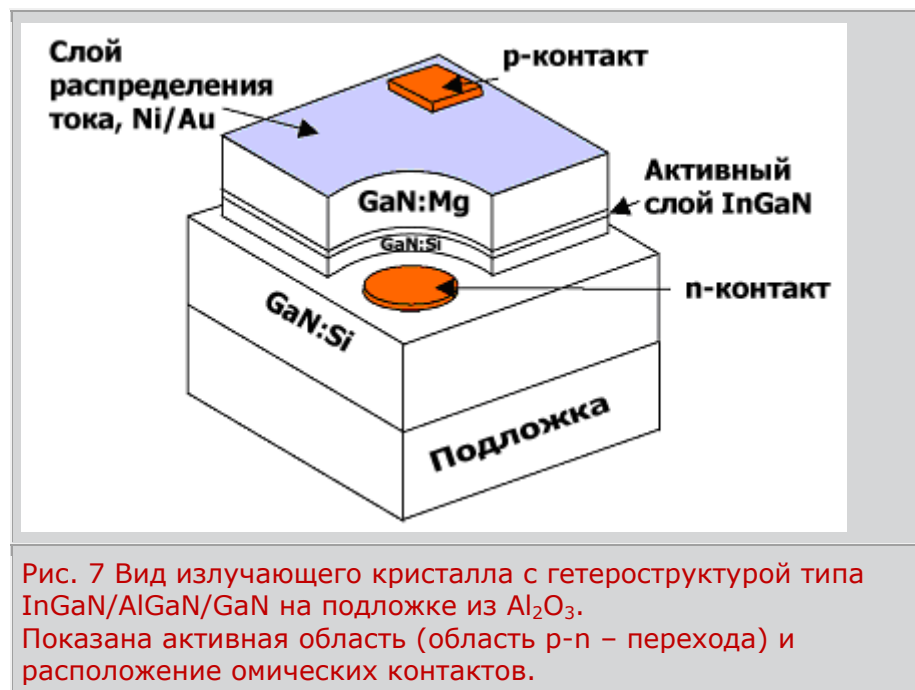
4. Светодиодные глубины. Основы полупроводниковой оптоэлектроники

Если в кристалле полупроводника создан р-п переход, т.е. граница между областями с дырочной (р-) и электронной (п-) проводимостью, то при положительной полярности внешнего источника тока на контакте к р-области (и отрицательной - на контакте к п-области) потенциальный барьер в р-п переходе понижается и электроны из п-области инжектируются в р-область, а дырки из р-области - в п-область.

Инжектированные электроны и дырки рекомбинируют, передавая свою энергию либо квантам света $h\nu$ (излучательная рекомбинация), либо, через дефекты и примеси - тепловым колебаниям решетки (безызлучательная рекомбинация). Вероятность излучательной рекомбинации пропорциональна концентрации электронно-дырочных пар, поэтому наряду с повышением концентраций основных носителей в р- и п-областях желательно уменьшать толщину активной области, в которой идет рекомбинация. Но в обычных р-п переходах эта толщина не может быть меньше диффузионной длины - среднего расстояния, на которое диффундируют инжектированные носители заряда, пока не рекомбинируют.

Задача ограничения активной области рекомбинации решена в конце 60-х годов Алфёровым и его сотрудниками. Были предложены и практически изготовлены гетероструктуры, сначала на основе GaAs и его твердых растворов типа AlGaAs, а затем и на основе других полупроводниковых соединений (рис. 7).

В гетероструктурах толщина активной области рекомбинации может быть много меньше диффузионной длины.



Рассмотрим энергетическую диаграмму гетероструктуры (рис. 8), в которой между внешними р- и п-областями полупроводника с большими величинами ширины запрещенной зоны E_{g2} , E_{g3} расположен тонкий слой с меньшей шириной E_g . Толщину этого слоя d можно сделать очень малой, порядка сотен или даже десятков атомных слоев. Помимо потенциального барьера обычного р-п перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов ΔE_c и дырок ΔE_v . Если приложить к переходу прямое смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой. Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх - к краю валентной зоны в слое, где минимальны их энергии.

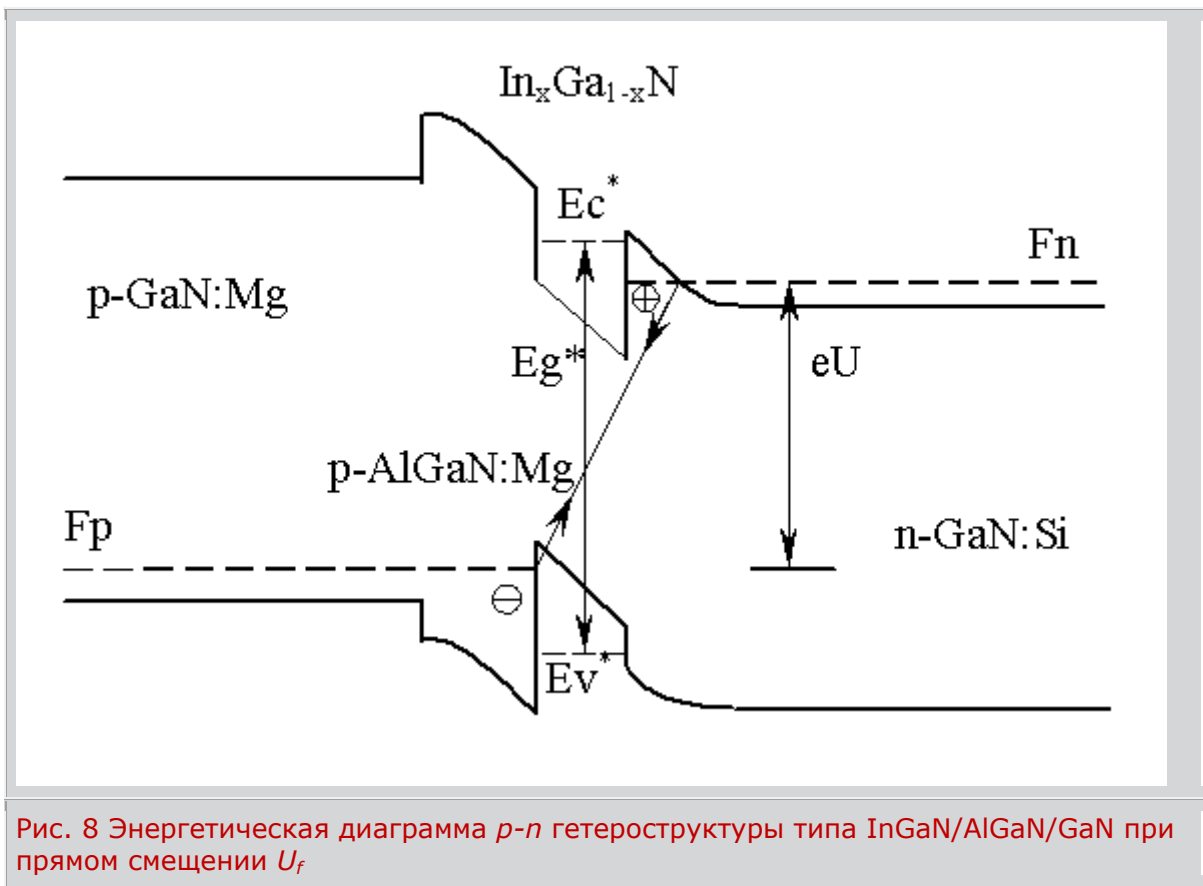
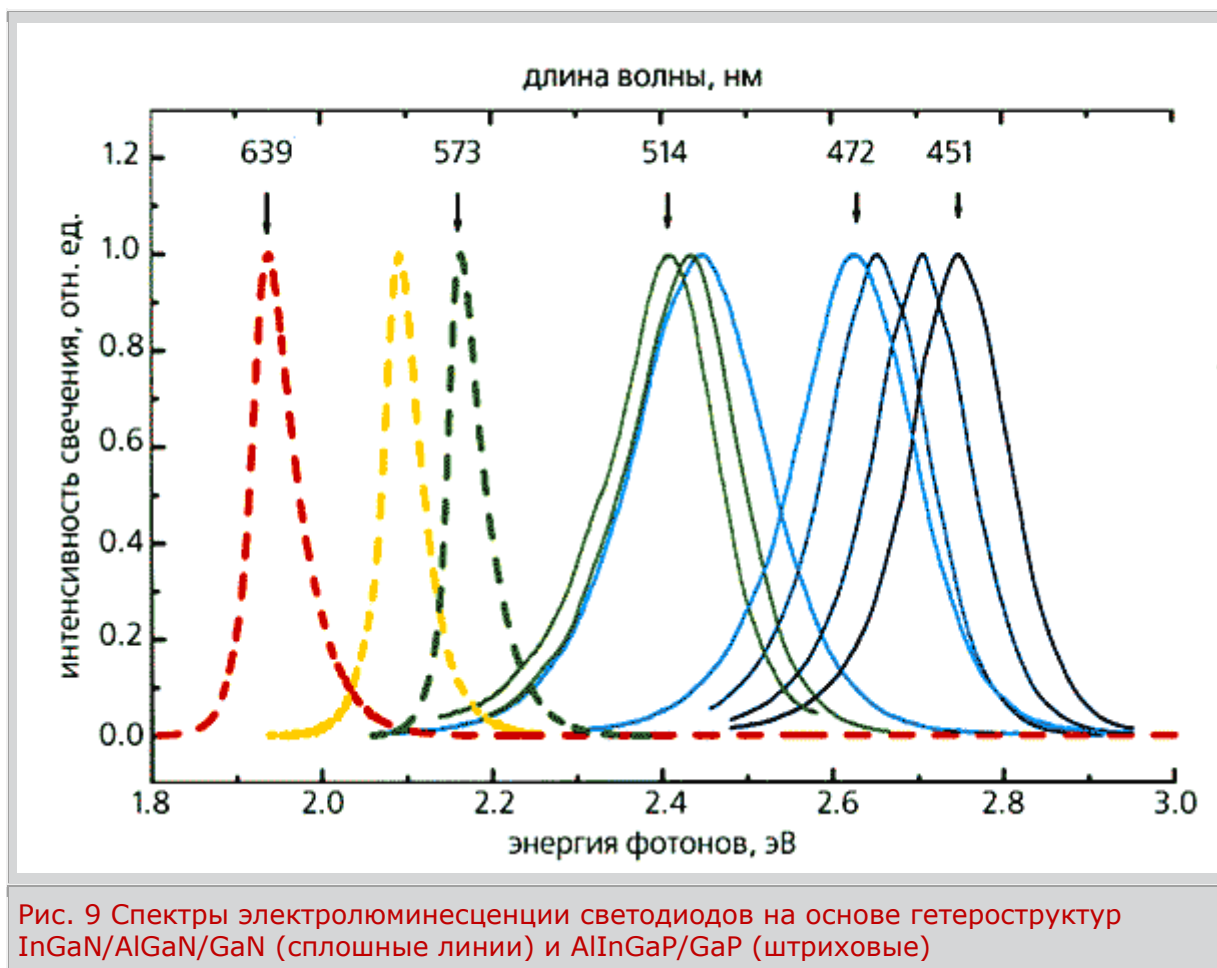


Рис. 8 Энергетическая диаграмма p - n гетероструктуры типа InGaN/AlGaIn/GaN при прямом смещении U_f

Широкозонные внешние части гетероперехода можно сильно легировать с обеих сторон, добиваясь больших концентраций в них равновесных носителей. И тогда, даже не легируя активную узкозонную область примесями, удастся достичь при инжекции значительных концентраций неравновесных электронно-дырочных пар в слое. Отказ от легирования активной области принципиально важен, поскольку атомы примеси, как уже говорилось, могут служить центрами безызлучательной рекомбинации. Попав в яму, инжектированные электроны наталкиваются на потенциальный барьер ΔE_c , дырки - на барьер ΔE_v , поэтому и те, и другие перестают диффундировать дальше и рекомбинируют в тонком активном слое с испусканием фотонов.

Применяемые материалы группы $A^{III}B^V$ имеют диапазон ширины запрещённой зоны от 1,9 до 3,5 эВ (рис. 9). Твёрдые растворы AlGaInP на различных подложках излучают в диапазоне от 650 до 580 нм, структуры на основе GaN, InGaN имеют наибольший квантовый выход в пределах 540–400 нм.



Рекомбинация электронно-дырочных пар в таких материалах происходит преимущественно с выделением кванта света. Энергия кванта $h\nu$ пропорциональна ширине запрещённой зоны E_g – энергии, которую должен затратить заряд для прохода через эту зону. О вероятности излучательной рекомбинации в узкозонном слое говорит внутренний квантовый выход излучения η_i (число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару). В гетероструктурах величина η_i теоретически может быть близка к 100%.

5. Некоторые особенности конструкции и параметров светодиодов для систем отображения информации

Несмотря на большое количество модификаций конструкций излучающих кристаллов, нельзя однозначно отдать предпочтение какой-либо одной. Если не говорить о качестве самого производства кристалла и соблюдения технологических процессов при их производстве, то выбор определяется, как правило, исходя из идеи построения оптической системы светодиода, на которую работает излучающий кристалл и задачи, которую впоследствии должен решать этот светодиод. В устройствах отображения информации светодиоды собраны в группы (кластеры) и не работают поодиночке (рис. 10).



Рис. 10 Фрагмент полноцветного кластерного экрана.
Пиксели собраны из светодиодов основных цветов.

Практически на всех режимах воспроизведения изображения, в работе участвует подавляющее большинство светодиодов одновременно. И здесь самым важным условием выбора светодиодов для таких устройств является идентичность большого числа характеристик приборов всех используемых цветов (если речь идёт о полноцветных системах) одновременно. Иначе, будет нарушено условие правильной цветопередачи и линейности яркости устройства в зависимости от угла обзора.

В настоящее время, одной из самых передовых является конструкция светоизлучающего диода с применением овальных линз (рис. 11), формирующих пространственное распределение с существенной разницей в углах излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.



Рис. 11 Светодиоды фирмы "COTCO" типа LO5SMQ-BOG с овальной оптикой 110°x50°

В некоторых случаях достижения такого эффекта и для обеспечения максимальной равномерности диаграммы в материал линзы локально или по всему объёму вводится диспергатор. В результате, получается достаточно рациональная конструкция: с одной стороны, широкий (как правило – 110° по уровню 0,5) угол в горизонтальной плоскости даёт возможность построить экран, наблюдаемый под большими углами в этой плоскости без искажений, с другой стороны, небольшой вертикальный ($30^\circ - 50^\circ$ по уровню 0,5) ограничивает бесполезное распространение светового потока в пространство, где нет наблюдения. Таким образом, весь световой поток от кристалла равномерно направляется на наблюдателя.

Однако сложность состоит в том, что распределение светового потока внутри диаграммы направленности светодиодов разного цвета свечения редко бывают одинаковыми. Хотя, угловые характеристики по уровню 0,5, указываемые в спецификациях совпадают. Это связано с особенностью конструкций кристаллов, их геометрическими размерами, правильно подобранной оптикой, процентного содержания диспергатора в материале линзы и т.д. А невыполнение этого условия и приводит к появлению описанных искажений изображения, сформированного кластером из таких светодиодов (рис. 12).

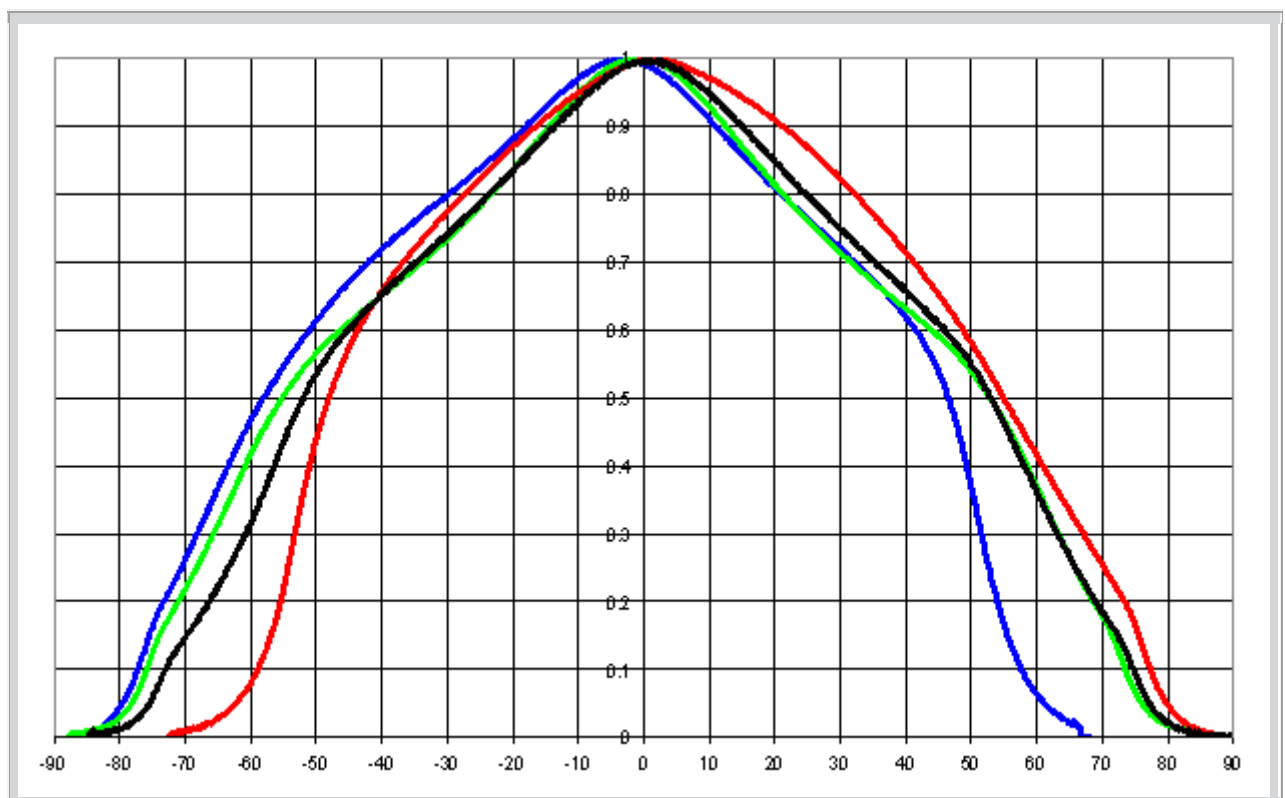


Рис. 12 Относительная диаграмма пространственного распределения силы света кластера из 3-х светодиодов R, G, B фирмы "Toyoda Gosei" типа E1 L4 E- S с овальной оптикой и линейным расположением светодиодов в горизонтальной плоскости. Чёрным цветом обозначена диаграмма в режиме баланса белого, близкого к источнику D65, остальными цветами - соответствующие цвета светодиодов. Показаны расхождения в направленности излучения каждого светодиода относительно оптической оси кластера.

Поэтому, важно понимать, что построение качественного устройства воспроизведения полноцветного изображения, где имеет место смешение цветов и формирование оттенков, невозможно без учёта характеристик распределения светового потока внутри диаграммы пространственного распределения излучения. Это условие касается также и условия минимального разброса интенсивностей излучения (силы света) всех светодиодов одного цвета, невыполнение которого проявляется в виде неравномерной засветки поля светящегося полотна. Глаз способен различить разницу яркостей двух элементов, находящихся в пределах его разрешения, отличающихся друг от друга всего на несколько процентов (при условии нахождения в пределах насыщения). Как показывает практика, выполнение этого условия в начале эксплуатации светодиодного устройства вовсе не означает, что оно сохранится в процессе работы. Этот факт будет обсуждён в следующем разделе статьи.

Следующим важным параметром, идентичность которого должна быть соблюдена обязательно, является колориметрическая характеристика. Следствием невыполнения этого требования будет появление различных неоднородностей воспроизведения цвета. Система управления формированием цвета будет настроена на определённое соотношение интенсивностей основных цветов по формуле [6], исходя из спектральных параметров,

$$F=rR+gG+bB$$

Формула [6]

описанных в разделе 3 статьи, чтобы получить белый цвет с необходимыми координатами цветности, однако, достаточно отличающиеся по цветовым параметрам светодиоды будут выделяться и исказят цветопередачу. Этот дефект будет тем более заметен, чем меньше ширина спектрального распределения излучения светодиода. Стоит отметить, что глаз очень чувствителен к изменению цвета и способен различать квазимонохроматическое излучение с точностью до 1-2 нм.

Но, кроме идентичности параметров спектрального распределения, необходимо остановиться на некоторых их значениях, требуемых для формирования правильной цветопередачи. МКО 1931 г. рекомендует следующие координаты основных цветов (Таблица 1):

	X	Y
R	0,61-0,7	0,32-0,35
G	0,27-0,36	0,55-0,65
B	0,13-0,17	0,04-0,08

Таблица 1

Следующим шагом в разработке конструкций светодиодов для систем отображения информации высокого качества стали многокристальные светодиоды с различным цветом излучения и полноцветный (RGB, Full color) прибор, содержащий 3 кристалла в одном корпусе (рис. 13), позволяющий формировать любой оттенок свечения, в том числе белый, как результат матрицирования 3-х цветов.

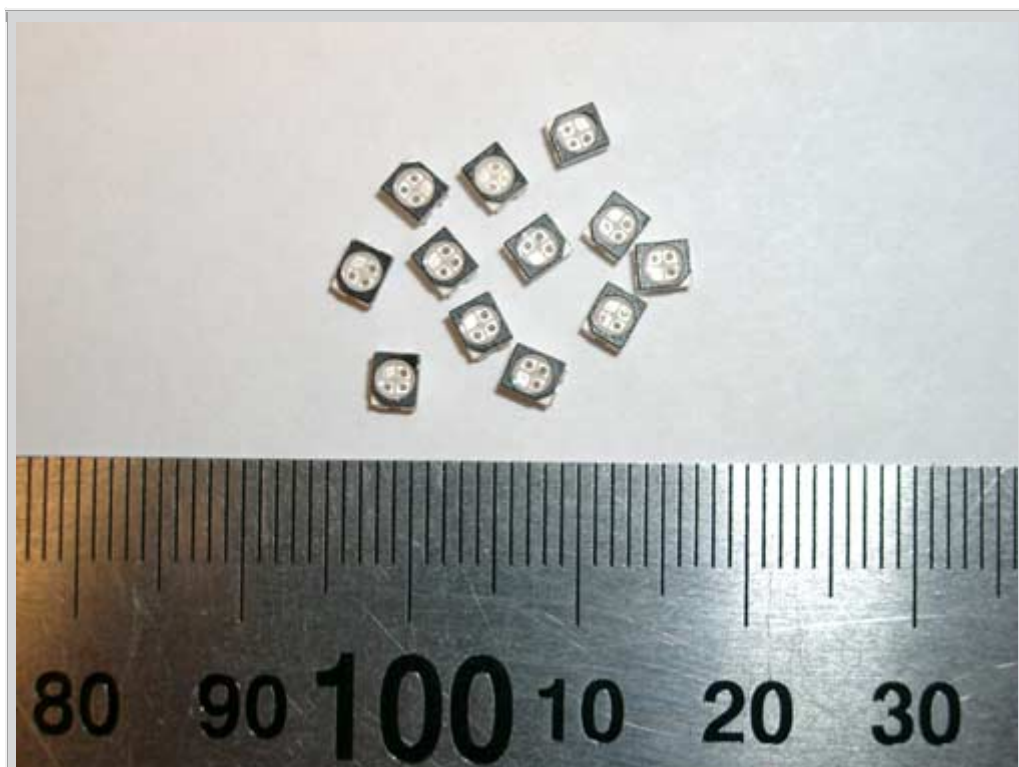


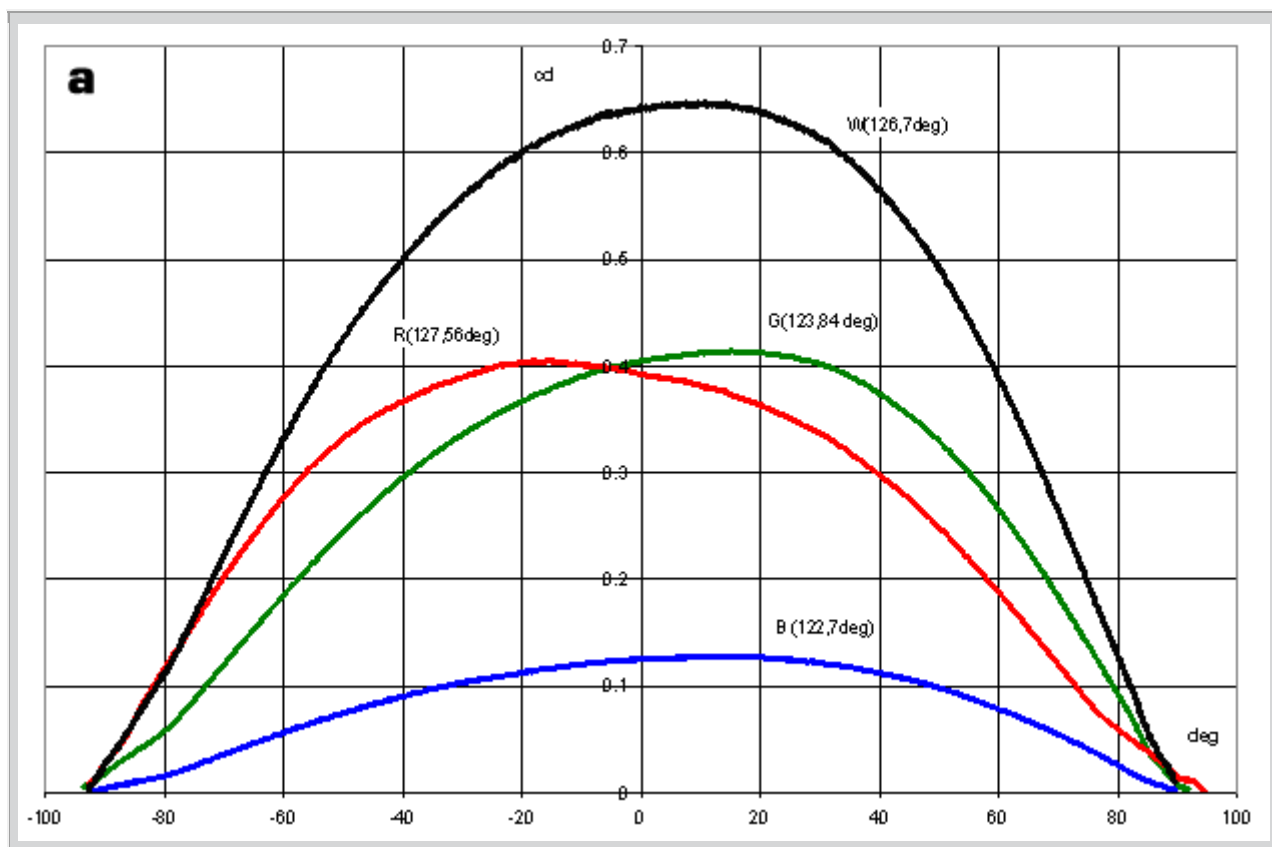
Рис. 13 Полноцветные светодиоды для SMD монтажа

Кристаллы расположены на одной общей подложке и находятся друг от друга на расстоянии, не превышающем 1–3 своих линейных размеров. Именно с использованием таких приборов стал возможен отказ от кластеров при изготовлении полноцветных экранов с высокой разрешающей способностью и яркостью до 2500 кд/м². Размер пикселя при этом получается равным размеру одного светодиода, а смешение цветов вообще происходит в точке с размером примерно 0,8х0,3 мм.

Более того, будучи расположенными на одном основании, все 3 кристалла имеют одинаковую температуру в любой момент времени, поэтому все тепловые уходы их параметров происходят одновременно, независимо от большой разницы прямых токов, и не влияют на результирующий цвет и интенсивность, сформированные в этот момент системой управления, в отличие от кластеров на дискретных светодиодах, где нет единой термостабилизации. Максимальный эффект этого свойства проявляется при формировании и воспроизведении белого цвета с большой частотой смены полей.

К достоинству описанной конструкции светодиода в части теплового режима стоит отнести и возможность использования его в импульсном режиме. Благодаря способности кристалла работать на больших (сотни МГц) частотах, возможно получение импульсной оптической мощности, равной десяти номинальным долговременным с сохранением фронтов до 10 нс (в зависимости от частоты повторения импульсов) при этом прямой ток через кристалл может достигать 100 мА.

Как правило, такие светодиоды исполняются в виде безвыводных элементов для SMD-монтажа и практически не имеют оптической системы, формирующей специфическую диаграмму направленности, поэтому она приближается по форме к $\cos^2\theta$, однако, взаимное геометрическое расположение кристаллов всё же, вносит искажения в равномерность смешения световых потоков (рис. 14).



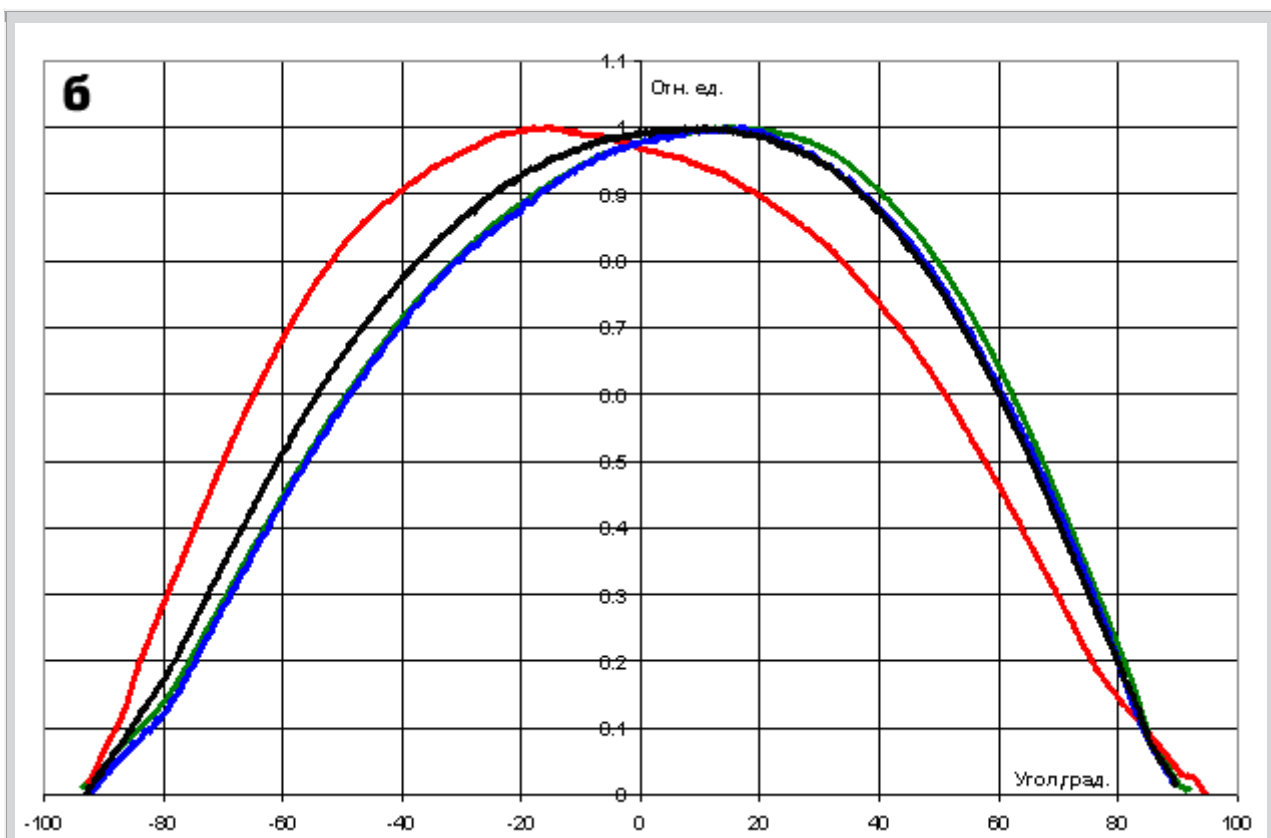


Рис. 14 Абсолютная (а) и относительная (б) диаграммы пространственного распределения силы света 3-х кристалльного RGB SMD светодиода LM1-TPP1-01 ТТQ фирмы "COTCO" с дельтаобразным расположением кристаллов внутри корпуса. Чёрным цветом обозначена диаграмма в режиме баланса белого, близкого к источнику D65, остальными цветами - соответствующие цвета свечения кристаллов. Показаны расхождения в направленности излучения относительно оптической оси светодиода.

Но, по сравнению со светодиодами с овальной оптикой, качество равномерности распределения намного выше на отдалённых от оптической оси углах, соответственно, больше и угол наблюдения без искажений. Существуют и конструкции многокристальных светодиодов с различными оптическими системами, упорядочивающими смешение потоков кристаллов и формирующих подобие диаграммы направленности овальных светодиодов. Это, например, светодиоды фирмы "Корвет-Лайтс" (рис. 15),



Рис. 15
а - светодиод с оптикой Френеля на цилиндре
б - светодиод с обычной цилиндрической линзой

позволяющие использовать кристалл при повышенных плотностях тока - до 80 A/cm^2 и обладающих увеличенной по сравнению с другими конструкциями светоотдачей. Однако, равномерного смешения световых потоков кристаллов при использовании оптической системы получить не удастся, поэтому широкого распространения такие приборы не получили, несмотря на свои незаурядные энергетические характеристики, едва до сих пор, кем-либо достигнутые. Также, в таких светодиодах существует проблема с упорядочением идентичности параметров кристаллов, о которой говорилось выше - ведь необходимо, чтобы все 3 кристалла были по параметрам очень близки к соответствующим в других светодиодах.

Добиться такого сочетания необходимо уже на уровне монтажа кристаллов в корпус, иначе, выход приборов с близкими параметрами будет невысок относительно всей партии. Такое действие достаточно трудоёмко с технологической точки зрения, и как следствие, приводит к удорожанию продукта.

Поэтому, как правило, берут за основу один параметр, который можно скорректировать уже в составе светодиода. Это - сила света. Цветовые характеристики кристаллов тестируются и разделяются ещё до монтажа. А впоследствии, интенсивность свечения каждого кристалла каждого светодиода в составе табло, например, доводится до одинакового значения программными средствами, либо коррекцией питания. Таким образом, реализуется идентичность характеристик в 3-х кристалльных светодиодах, используемых группами.

Подавляющее большинство систем управления интенсивностями свечения светодиодов реализовано на принципе широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с большим количеством дискретов. Достоинства этого принципа управления, кроме удобства цифровой обработки данных сигнала, с точки зрения режимов работы светодиодов в том, что прямой ток через светодиод остаётся постоянным всегда, а изменяется лишь длительность импульса этого тока. Глаз интегрирует световой поток за период времени до следующего импульса и получается, что время свечения светодиода, пропорциональное времени импульса, определяет интенсивность излучения.

Это условие можно легко учесть программно и на самых малых уровнях интенсивности при самых коротких импульсах, когда интеграционная характеристика глаза приобретает функцию e^x с большими значениями x и на самых больших, когда наступает насыщение, сохраняя тем самым линейность яркостной характеристики. Постоянство прямого тока через светодиод определяет соответствующее постоянство большинства ключевых параметров светодиода, в основном зависящих прямо или косвенно только от тока (Люмен-Амперная характеристика, зависимость полуширины спектра излучения, Вольт-Амперная характеристика, и т. д.). Таким образом, при использовании подобных систем управления устройством отображения информации, проблемы уходов характеристик светодиодов сведены преимущественно только к температурным зависимостям. И, хотя, это также является довольно серьёзной темой для обсуждения, стоит говорить об этом отдельно, чтобы рассмотреть все подробности.

6. Анализ параметров и прогноз качества светодиодов для систем отображения информации от различных производителей, методом исследования деградационных характеристик

Ведущими в мире производителями полупроводниковых кристаллов считаются компании "Nichia", "Toyoda Gosei", "Hewlett Packard", "Cree", "Osram", "Lumileds", "Epistar". Эти компании отличаются друг от друга не только количеством произведённой продукции, а что самое важное – принципиально различными конструкциями кристаллов собственных разработок. Поэтому, исследуя конкретный светодиод, помимо его технических характеристик, совсем немаловажно знать на основе кристалла какого производителя он изготовлен.

Как правило, знание этого обстоятельства, сразу ответит на многие вопросы опытному пользователю светодиодами ещё до рассмотрения им других данных. Однако, любая наука базируется на исключительно объективных сведениях. Получение их – довольно непростое дело, но в этом разделе хотелось бы обсудить именно такие – объективные результаты исследований параметров кристаллов и светодиодов, полученных в результате многих тысяч измерений и расчётов их характеристик. Во внимание были взяты лишь физические величины, цифры, показания приборов и сравнительные характеристики на их основе.

Были досконально исследованы светоизлучающие диоды более чем 20 фирм-производителей, в том числе, использующих кристаллы указанных выше лидирующих компаний.

Самому детальному исследованию были подвергнуты светодиоды на основе кристаллов "Lumileds", "Epistar", "Cree" производства "Cotco", "Retop", "Acol", "Lasemtech Inc", светодиоды на основе кристаллов "Toyoda Gosei", "Nichia". Параллельно исследовались светодиоды на основе кристаллов, произведённых в Юго-Восточной Азии. Это приборы фирм "Brightek", "ETR", "Guangyi", "Lanbaoli elektroniks", "Golden Valley Opto", "Lite-Max opto", "Sino", "Ultralight Electronic", "Sitronics Co.", "LED YI LIU", "Kena", "Shuen", "Ningbo Foryard Opt.", "SanderR", "Ledman" и другие.

Все образцы исследовались по одинаковой методике. Исследования велись при одинаковых условиях и с максимально возможным количеством измеряемых параметров. Во время

наработки, каждый светодиод питался от отдельного индивидуального стабилизированного источника тока, с точностью поддержания тока $\pm 0,5$ мА. Это обстоятельство исключает возможность появления деградации параметров из-за колебаний прямого тока через кристалл. Большинство выводов сделано на основе наблюдений за изменениями зависимостей параметров в течение не менее 10 000 часов непрерывной работы светодиодов.

Помимо величин, изменяющихся в зависимости от прямого тока через кристалл, поддающихся моделированию или измерению (световой поток или сила света – люмен – Амперная характеристика, Вольт – Амперная характеристика, зависимость координат цветности от прямого тока и т. д.), есть и такие, как например, срок службы, необратимая деградация и т. п., которые не могут быть достоверно установлены в зависимости от изменения вышеуказанного параметра.

Значения этих характеристик возможно косвенно предположить исходя из определения степени близости условий работы кристаллов при различных токах к условиям их работы на нормируемом производителем токе и нормируемым при этом токе срокам службы. А также, анализируя поведение спектральных и фотометрических характеристик излучения при больших токах, по которому можно достаточно точно судить о "здоровье" кристалла, светодиода в целом и его возможном потенциале.

Необходимость данных этого исследования возникает при моделировании новых конструкций светодиодных устройств, учитывающих возможность работы кристаллов при больших плотностях тока, прогнозов ухода параметров при колебаниях температуры окружающей среды, а также при конструировании устройств отображения информации и сигнализации высокой надёжности.

К каждому типу исследуемых светодиодов обязательно применялся метод последовательных измерений большого количества параметров в зависимости от времени наработки (деградационные характеристики параметров – зависимости их значений от времени наработки), что в свою очередь подтвердило отличную эффективность этого метода для определения качества светодиодов. Появилась возможность связать малые отклонения от типичных в характеристиках у светодиодов без времени наработки, с характеристиками после некоторой наработки, приводящие впоследствии к выходу светодиода из строя. Это позволяет сделать достоверный прогноз качества, срока службы и поведения характеристик прибора в процессе всего времени эксплуатации, не прибегая к длительным испытаниям.

По поведению показателей наиболее важных параметров приборов различных конструкций и производителей в течение временной наработки все светодиоды были условно разделены на несколько групп по степени изменения характеристик и изначального (без наработки) соответствия значениям, обозначенным в спецификациях.

Группа 1

Результаты исследований, прежде всего, выявили общее повышение энергетики выхода используемых кристаллов относительно прежних показателей. Наиболее продвинутой в плане освоения новых технологий в производстве светодиодов оказалась фирма "Cotco", которая применила в своих светодиодах новый тип кристалла на основе InGaN/GaN на подложке SiC. Это кристаллы серий Cree XBright™, Cree XThin™ устанавливаемые способом "flip-chip" на эвтектическую прослойку, нанесённую на рамку светодиода. Они стали удачным продолжением в усовершенствовании кристаллов MBright™ на подложке SiC, отличающейся лучшей, чем сапфир, совместимостью кристаллических решёток подложки и выращенной на ней структуры InGaN/GaN.

Применение кристалла XBright™ позволило практически сравнять энергетические показатели светодиодов синего и зелёного цвета излучения со светодиодами фирмы "Nichia", не изменяя цены, и что самое важное - надёжности, светодиода, а светодиоды с кристаллом Cree XThin™ фирмы "Ledman" превзошли по энергетическим параметрам идентичные по структуре характеристик приборы лидера светодиодостроения. Например, высший ранг наиболее используемых в экранах светодиодов с овальной линзой и углом излучения $110^\circ \times 50^\circ$ светодиодов фирмы "Nichia" NSP_546 имеет осевую силу света до 2,4 кд (зелёный цвет), в то время как фирма "Cotco" заявляет 2,3 кд у LO5SMQPG4-BOG-A1, что действительно подтвердилось при исследованиях. Синий светодиод "Cotco" LO5SMQBL4-BOG-A1 также с углом излучения $110^\circ \times 50^\circ$, имеет осевую силу света до 0,75 кд (таблица 2). Световой поток кристаллов Cree представлен в таблице 3.

	Тип Iv, кд	
	Nichia 110°x50°	Cotco 110°x50°
Зеленый	2,44	2,3
Синий	1,0	0,75

Таблица 2

Цвет			
	MBright™	XBright™	XThin™
Зеленый	1,4	1,8	2,1
Синий	0,3	0,5	0,7

Таблица 3

Световая отдача кристаллов Cree XThin™ достигает 35 - 40 лм/Вт за счёт значительного уменьшения прямого падения напряжения U_f во всём диапазоне токов. На рис. 16 и 17 показана эволюция Вольт–Амперных характеристик семейства кристаллов Cree, наглядно поясняющая это утверждение.



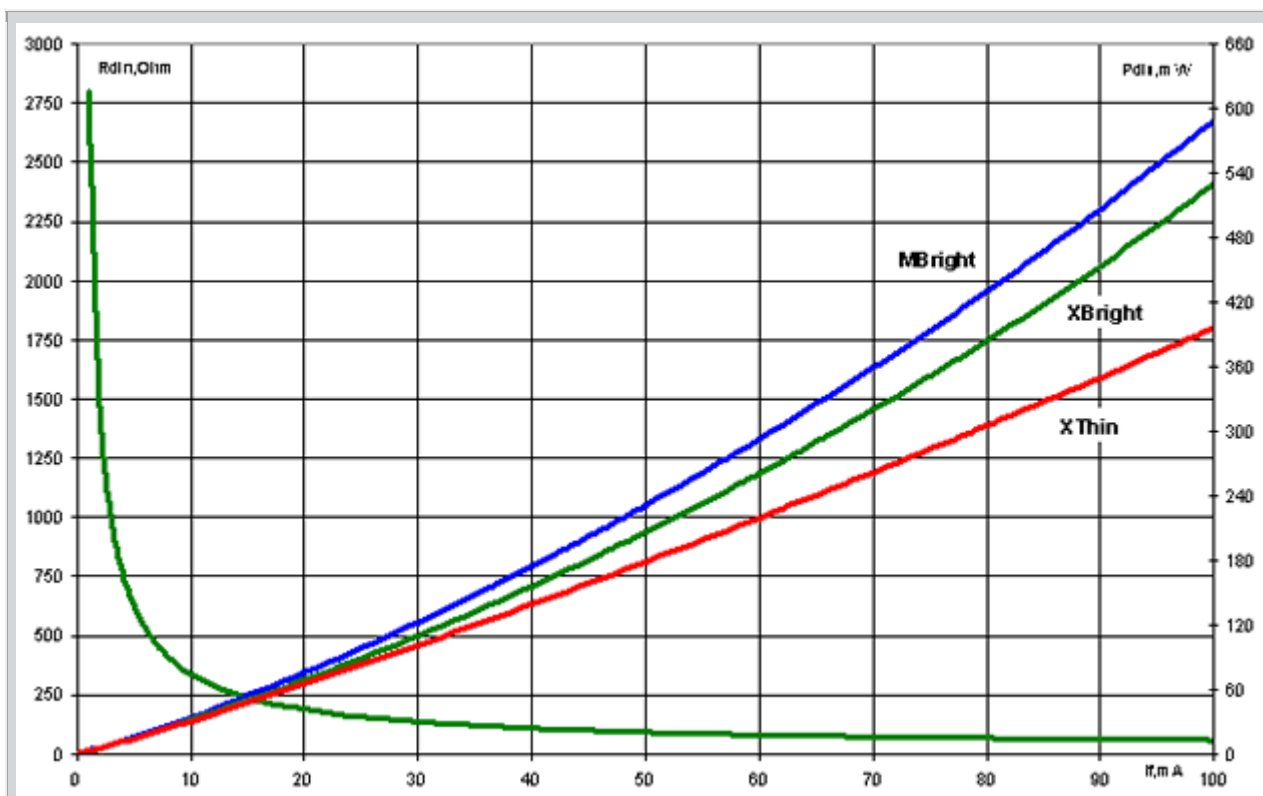


Рис. 17 Зависимость потребляемой мощности P_{dis} от прямого тока I_f и динамическое сопротивление R_{din} кристаллов Cree

Использование таких светодиодов позволяет формировать экраны и табло с шагом пикселей 22 мм и яркостью до 8000 кд/м². При шаге пикселей 19 мм, можно достичь яркости 10 000 кд/м². При этом полностью сохраняется надёжность и долговечность работы экрана.

В чём секрет этих светодиодов? Особая конструкция кристаллов Cree XBright™, Cree XThin™ (рис. 18) одновременно решает несколько задач:

- великолепный отвод тепла от **p-n** – перехода (тепловое сопротивление **p-n** – переход – кристаллодержатель всего 2-5 град./Вт), активная область расположена всего в 2-3 мкм от эвтектического слоя;
- выгодное, с точки зрения, хода оптических лучей, расположение граней и распределение излучения внутри кристалла – по всему объёму, поэтому выход квантов наблюдается по всей поверхности граней кристалла, а их площадь примерно в 4 раза больше, чем у кристалла на подложке из **Al₂O₃** (рис. 19);
- площадь верхнего омического контакта, несмотря на маленький размер, не влияет на равномерность растекания тока, т. к. **p-n** – переход расположен в противоположной стороне от него, а распределение тока формируется толщей подложки SiC и специальным слоем AuSn. Нижний контакт занимает всю площадь нижней грани. Поэтому, вся площадь активной области работает при одинаковой плотности тока, и нет локализации излучения, находящейся в зависимости от расположения омического контакта;
- высокая механическая прочность эвтектического соединения кристалла с металлической рамкой светодиода. Устраняются проблемы разности коэффициентов линейного расширения кристалла и материала рамки (подложки) при увеличении температуры работающего кристалла;
- кристалл имеет большой динамический диапазон и запас по импульсным токовым нагрузкам. Линейность Люмен-Амперной характеристики сохраняется вплоть до тока 120 мА, что соответствует его плотности почти в 200 А/см². Кристаллы конструкций на Рис. 19 теряют линейность, едва достигая плотности тока 100 А/см² - 120 А/см².

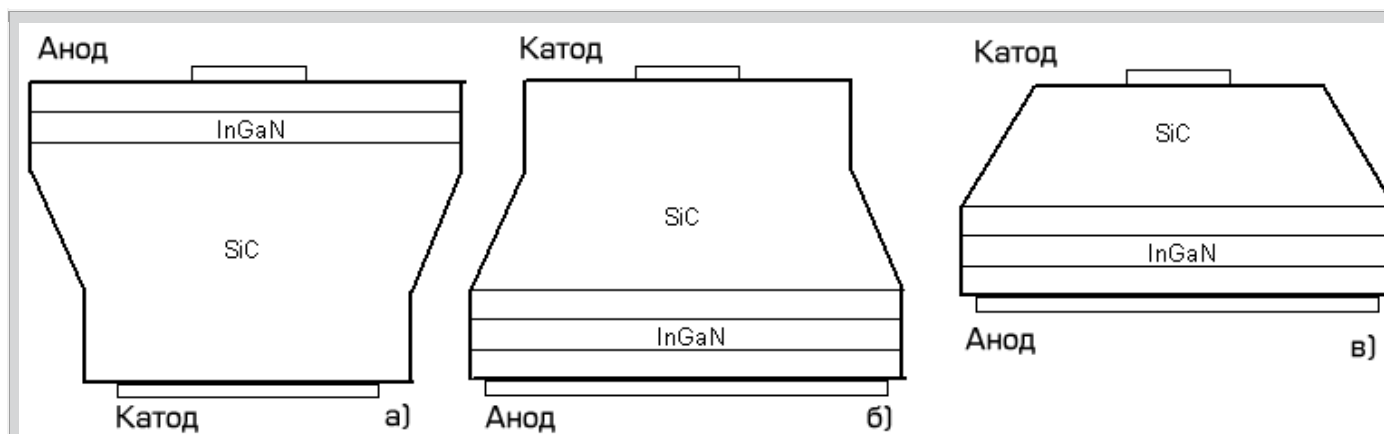


Рис. 18 Кристаллы фирмы "Cree"

а) MBright™, б) XBright™ – высота 250 мкм, в) XThin™ – высота 115 мкм

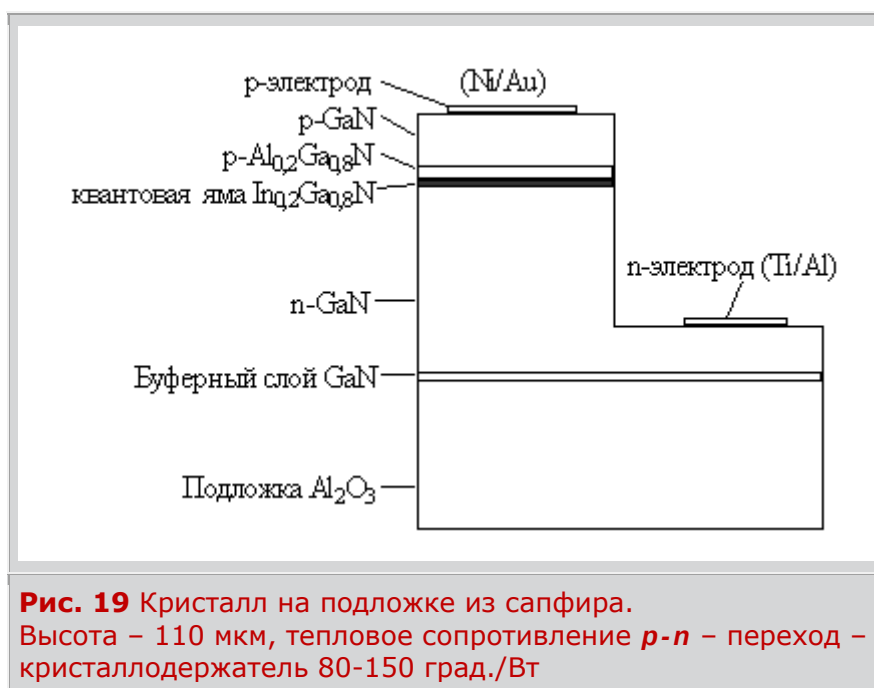


Рис. 19 Кристалл на подложке из сапфира.

Высота – 110 мкм, тепловое сопротивление *p-n* – переход – кристаллодержатель 80-150 град./Вт

Однако, технология посадки кристалла способом "flip-chip" встречается не впервые. Фирма "Toyoda Gosei" применяет эту технологию для кристаллов на подложках из Al_2O_3 . Светодиоды этой фирмы отличаются высокой надёжностью, которую, помимо конструкции кристалла, обеспечивает ещё и смонтированный рядом с излучающим кристаллом, быстродействующий диод Шоттки, включённый обратно и шунтирующий светодиод при подаче большого обратного напряжения. Однако, светотехнические параметры этих светодиодов ниже, чем у "Cotco".

Группа 2

Другая часть производителей, которые используют в производстве своих светодиодов кристаллы преимущественно конструкций – прототипов "Nichia", разделилась на несколько категорий по различным качественным показателям приборов на однотипных кристаллах. Но, все они не достигли таких значений силы света и других энергетических показателей светодиодов, как у ведущих фирм. Часто, реальные параметры светодиодов абсолютно разнились с заявленными в спецификациях, обладая и по этим данным не самыми лучшими характеристиками.

Делается это недобросовестным производителем исключительно для того, чтобы обозначить свою продукцию среди других на должном уровне, и сделать её выгодно продаваемой, потому как проверить истинность параметров потребителю в подавляющем большинстве случаев бывает невозможно, а по виртуальным – написанным на бумаге характеристикам светодиоды обладают неплохими параметрами. Однако, на самом деле выясняется, что всё далеко не так.

Группа 3

Следующая категория – это светодиоды, с большим фактором деградации квантового выхода от времени наработки, связанного как с некачественным кристаллом, так и с нарушением технологии при сборке светодиода. В эту группу попали светодиоды фирм "Lite-Max opto", "Sino", "Ultralight Electronic", "Guangyi", "Ningbo Foryard Opt.", "Sander", использующие кристаллы неизвестных производителей из Юго-Восточной Азии. Подавляющее большинство этих кристаллов имеет широко известную структуру, представленную на Рис. 19, однако, их характеристики не имеют ничего общего с такими же производства "Nichia" по всей вероятности из-за несовершенства оборудования и несоблюдения технологического процесса их выращивания.

Детальные результаты измерения, получения и моделирования деградационных характеристик требуют более тщательного, чем просто ознакомительное, обсуждению из-за большого объема в плотную связанных друг с другом параметров, и непременно станут темой будущих статей. Однако стоит привести одну из самых наглядных диаграмм, иллюстрирующих процесс деградации наиболее важного параметра светодиода во времени – пространственного распределения силы света в зависимости от времени наработки $I_v(T)$ (рис. 20).

Возможно построение зависимости изменения светового потока от времени наработки (как наиболее корректной с точки зрения физики процесса), но наглядность этого графика для пользователя будет недостаточна для объяснения картины происходящих изменений в светотехнических параметрах, к которым привязаны большинство спецификаций на светодиоды. "Интегральность" этого параметра не позволит проследить за изменениями угловых характеристик и значений силы света на разных участках диаграммы.

Как видно из диаграммы, помимо значительного уменьшения осевой силы света I_v происходит одновременное уменьшение и перераспределение светового потока по углу излучения, изменение угловых характеристик светодиода по разным уровням I_v и, как следствие, пропорциональное этому явлению, изменение светотехнических характеристик устройства отображения информации в целом. Наиболее это заметно, если подобная деградация происходит лишь у части светодиодов, образуя пятна и области с нарушенной цветопередачей и разной яркостью.

Однако, протекание подобной деградации у светодиодов никогда не происходит равномерно у всех образцов, у которых она возникла, из-за различия в природе её появления, а самое главное, что применяемые в кластере светодиоды, как говорилось ранее, выполнены на основе кристаллов разных структур, изменения параметров которых изначально не могут быть одинаковыми. Поэтому, сам факт появления деградации, отличающейся по характеру от нормальной для этих материалов кристаллов, уже говорит о недопустимости его возникновения у светодиодов, составляющих полотно изображения устройства. Как правило, поведение именно этого графика (рис. 20) в первые несколько сотен часов работы может многое сказать об отклонении и других характеристик светодиода от нормы.

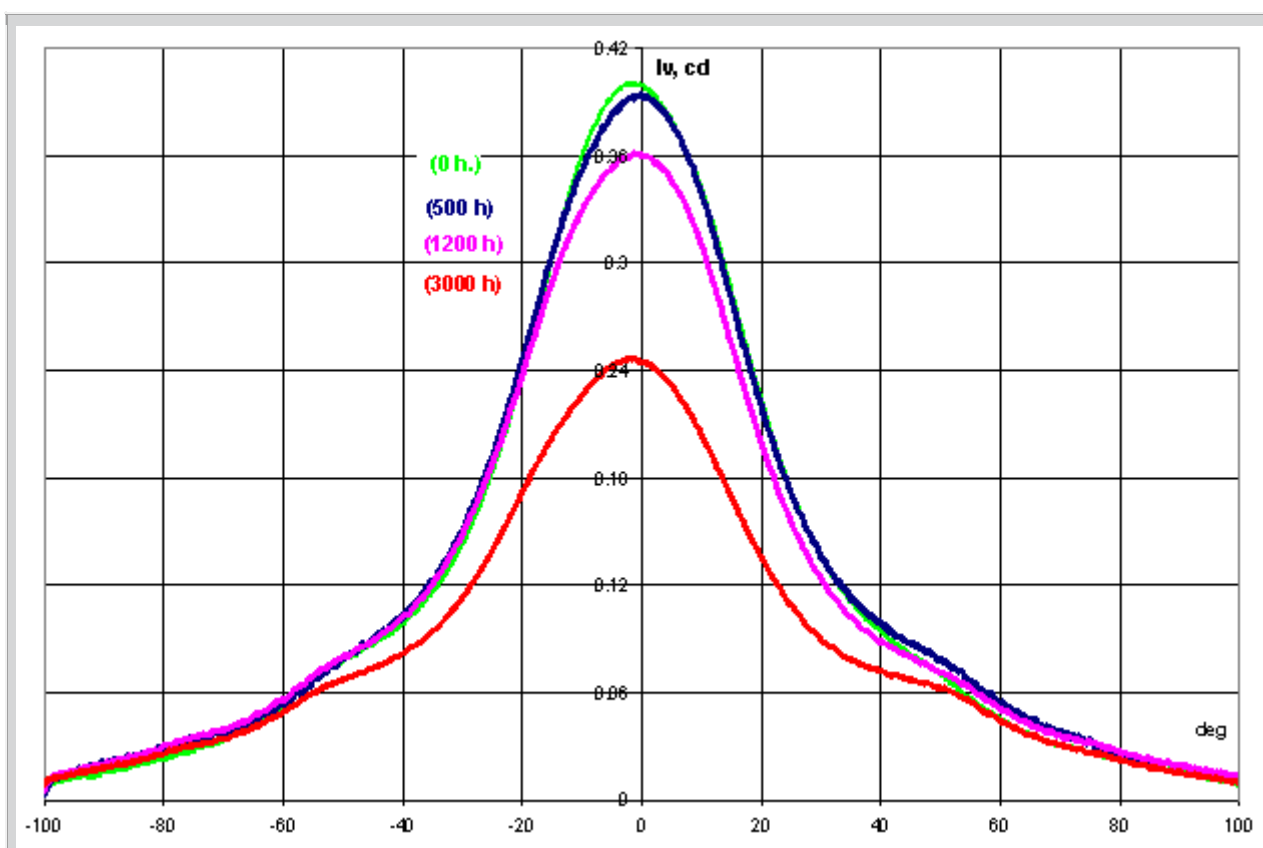


Рис. 20 Зависимость $I_v(T)$ светодиода SF-5EDB24 110X50 фирмы "Sino".
Дана диаграмма углового распределения силы света в вертикальной плоскости излучения. Цифрами обозначено время наработки в часах (h).
Цвет цифры соответствует цвету кривой на графике.

Группа 4

Ещё одну категорию составляют светодиоды "Sitronics Co.", "LED YI LIU" и др., с большим разбросом параметров (более +50% по I_v) в партии из нескольких сотен штук, усугубляющимся деградацией, не позволяющим использовать их в сколь ответственной аппаратуре, требующей единства характеристик всех светодиодов группы, поэтому детальное рассмотрение их не приводится.

Исследования статистических данных производства больших партий (до 1 млн. штук) некоторых производителей (например, "Cotco") показали, что вне зависимости от категории (группы светодиодов, разбитых по принципу идентичности или малого (до $\pm 10\%$) разброса параметров) количество образцов, определённых описанным методом как неизбежно выходящих из строя практически одинаково, и составляет примерно 12 - 15%. Некоторые данные о результатах этих исследований сведены в Таблицу 4.

Группа светодиодов	Средний разброс осевой $I_{vв}$ партии, %		Средний деградация осевой $I_{vв}$ партии, %	% деградировавших по $I_{vв}$ светодиодов в партии
	заявлено	реально		
1	15	9	-5...7	8-12
2	15	16	-10	10-12
3	12	15	-25...30	30-40
4	15	30	-25...30	40-60

Таблица 4

Причём, изначально, эти светодиоды признаются годными, потому как действительно соответствуют всем параметрам производителя, которые он указывает в спецификации.

Конечно, приведённые цифры колеблются в зависимости от качества партии применяемых пластин кристаллов, соблюдения технологической дисциплины, и т. д. Однако, селекция потенциально неисправных образцов на производстве и является продолжением и развитием описанной методики (с помощью деградационных характеристик) определения критериев, по которым необходимо проводить эту селекцию. Таким образом, удастся применять абсолютно качественные светодиоды, отсортированные по необходимым критериям и быть уверенным в том, что их параметры непосредственно в проектируемом изделии не будут изменяться непредсказуемо.

7. Некоторые итоги исследований

Подытоживая сказанное, стоит заметить, что важность проводимых исследований и постоянного мониторинга новаций и разработок, позволяет не только судить о состоянии рынка светодиодной продукции, но и принимать правильные решения в стратегии использования тех или иных светодиодов в устройствах на их основе. Нельзя не уделять внимание некоторым, принципиально разнящимся с классическими, разработкам в области создания новых средств для полупроводниковой оптоэлектроники. Именно такой подход требуется при проектировании современных устройств отображения информации и оправдан качеством и высокими параметрами производимых экранов и табло на светодиодах при устойчивой тенденции к снижению их стоимости.

Литература:

1. Sze S. M. "Physics of Semiconductor devices" - 1984
2. Moss T. S. "Semiconductor Opto – Electronics" - 1973
3. Абрамов В. С., Никифоров С. Г., Соболев П. А., Сушков В. П. "Свойства зелёных и синих InGaN – светодиодов". "Светодиоды и лазеры" №1 – 2, (2002 г.) стр. 30-33
4. Агафонов Д. Р., Аникин П. П., Никифоров С. Г. "Вопросы конструирования и производства светоизлучающих диодов и систем на их основе". "Светотехника" №6 (2002 г.) стр. 6-11

Автор: Никифоров Сергей Григорьевич, Москва

Настоящая статья публикуется впервые.

Каким-либо другим изданиям не предлагается. В Интернете не размещалась.