

# Проблемы, теория и реальность светодиодов

## для современных систем отображения информации высшего качества

**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 возможность получения любого оттенка в широком динамическом диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве источников света для этих устройств.**

Сергей Никифоров

nikiforov@screens.ru

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

### Полупроводниковые источники света

Когда-то задача высечь огонь из чего бы то ни было была самой актуальной для человечества. На определенном этапе огню, полученному с помощью кремния, «было поручено» большое количество функций, одной из которых является его важная составляющая — свет. По-разному решалась эта задача в прежние века, но здесь речь пойдет 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 его создания 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, ширина запрещенной зоны которых более 1,9 эВ. В настоящее время созданы структуры, способные излучать во всем видимом диапазоне, в ближнем ИК и ультрафиолете. Большой выбор цветов свечения, комбинация мощного излучения с любой формой пространственного распределения и возможность получения любого оттенка в широком динамическом диапазоне яркостей открывают огромные перспективы использования светоизлучающих диодов в качестве различных источников света.

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

В последнее время светоизлучающие диоды все больше претендуют на использование их в освещении, художественной подсветке, сигнальной технике. Все это стало возможным благодаря достаточно быстрому росту энергетических показателей, надежности и долговечности квазимонохроматических источников излучения. Малое потребление электрической энергии, легкость 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. Однако это порождает особые требования к характеристикам светодиодов. Исследования, оценки и сравнения этих характеристик и стали предметом обсуждения в данной статье.

### Теория светотехнических и электрических характеристик современных светодиодов и ее связь со спецификациями производителей

Самой распространенной и обобщающей единицей, характеризующей энергетические параметры светодиода, является осевая сила света  $I_v[\text{cd}]$ . Однако эта величина абсолютно не читаема, если не указать угол излучения  $\theta$  по некоторому уровню от  $I_{v\text{max}}$ . Обычно говорится об угле излучения по уровню половины максимальной силы света —  $\theta_{0,5I_{v\text{max}}}$  хотя иногда указывают и силу света по уровню  $\theta, I_{v\text{max}}$  —  $\theta_{0,1I_{v\text{max}}}$ . Совокупность двух параметров — угла излучения и осевой силы света — уже дает представление (хотя и очень грубое), в каком направлении распространяется и какой будет сила света при различных углах наблюдения. Для более точного определения величины силы света при любом угле наблюдения обычно приводится двухкоординатная плоская зависимость  $I_v(\theta)$ , часто называемая индикатрисой излучения (рис. 1).

Важной энергетической характеристикой излучения светодиода является световой поток  $F(\text{lm})$ , определяющийся как интеграл всей энергии, заключенной под пространственной индикатрисой излучения [1]. Именно этот параметр производители светодиодов часто указывают в спецификациях. Особенно это касается мощных приборов с большим углом излучения и равномерным пространственным распределением, стремящимся к Ламбертовскому. Однако даже в этом случае невозможно достоверно оценить распределение светового потока внутри диаграммы и, соответственно, правильно оценить силу света светодиода. Подавляющее большинство простых математических пересчетов 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 пересчета 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 только непосредственным измерением этой величины можно с большой точностью получить ее 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. При измерениях светодиодов с разным пространственным распределением силы излучения можно получить

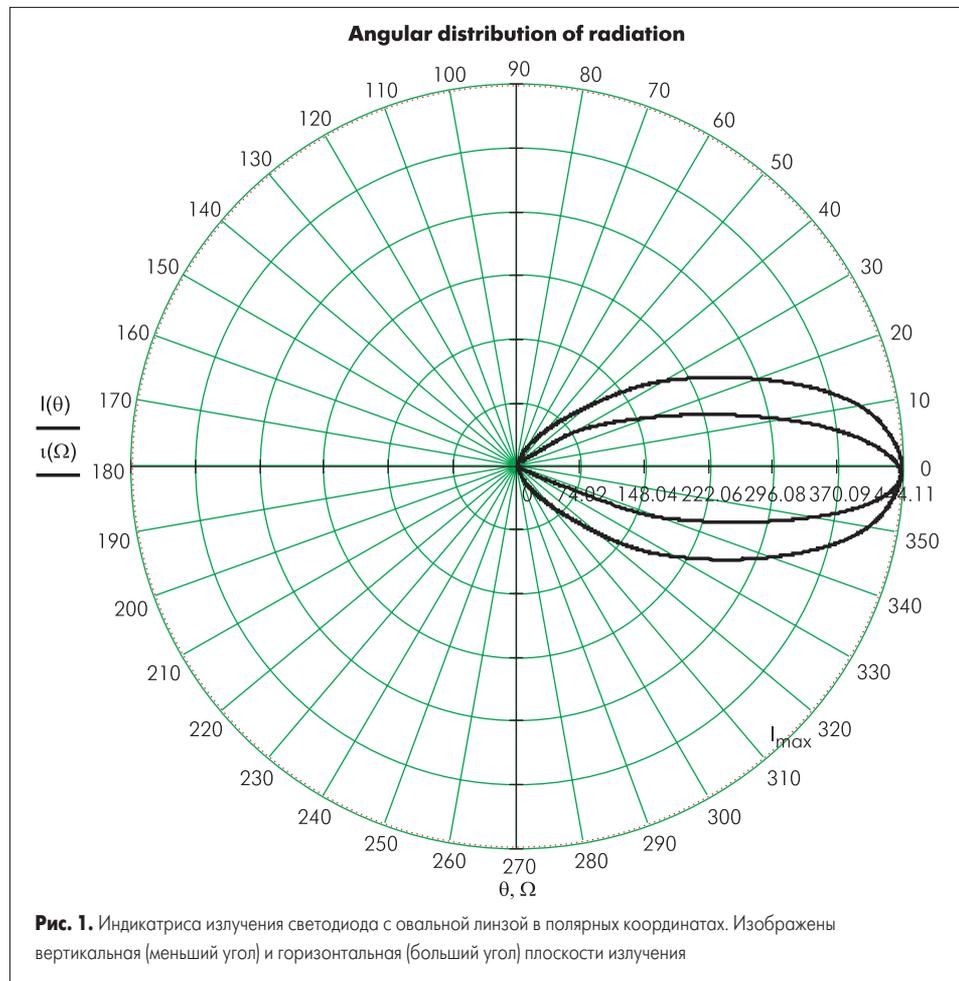


Рис. 1. Индикатриса излучения светодиода с овальной линзой в полярных координатах. Изображены вертикальная (меньший угол) и горизонтальная (большой угол) плоскости излучения

большие ошибки, так как 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. 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 при повороте светодиода 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 ее пространственное распределение. На основании этих данных рассчитывается световой поток.

Получение светового потока светодиода  $F$  с пространственным распределением силы света произвольной формы определяется с помощью индикатрисы излучения большого чис-

ла плоскостей ( $nI_v(\theta)$  при  $n \rightarrow \infty$ ) и последующим вычислением среднего значения  $F$  [2].

$$F_n := \int_{\theta_n}^{-\theta_n} I_v(\theta_n) d\theta_n \quad (1)$$

$$F_\Sigma := \frac{F_{1\dots n} + F_n}{n} \quad (2)$$

Распределение светового потока внутри диаграммы направленности позволяет судить о том, какая его часть попадет к наблюдателю в зависимости от угла его зрения. Следует напомнить, что МКО 1931 г. регламентирует т.н. «стандартного колориметрического наблюдателя», угол зрения которого определен в 1 градус (рис. 2). Это обстоятельство учитывается при выборе данного параметра светоизлучающего диода в зависимости от его назначения. Однако часто пользуются лишь индикатрисой излучения, что не всегда верно при расчетах восприятия изображения, необходимой его интенсивности на разных расстояниях от источника и размеров самого источника излучения.

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» [3]; используется другая единица, с помощью которой характери-

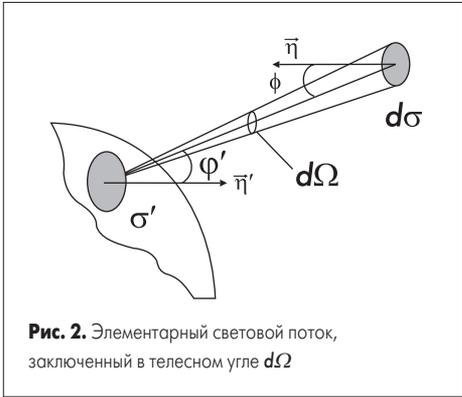


Рис. 2. Элементарный световой поток, заключенный в телесном угле  $d\Omega$

зуется энергетика излучения такого протяженного источника — яркость  $Y$  [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ].

$$I_v := f \left( \frac{E}{l^2} \right) \quad (3)$$

Яркость определяется как сила света источника с произвольным распределением излучения по отношению к площади его излучающей поверхности [4].

$$Y_{max} := \frac{I_{vmax}}{S_d} \quad (4)$$

Эффективность излучателя света характеризуется отношением светового потока ( $\text{lm}$ ) к потребляемой электрической мощности ( $W$ ). Эта величина, называемая светоотдачей, для светодиодов из материалов типа  $A^mB^v$  стала больше, чем у ламп накаливания во всех основных цветах видимого диапазона. Современные светодиоды имеют эффективность, достигающую 20–30  $\text{lm}/W$ , а КПД колеблется от 9–16% в приборах на основе нитрида галлия и его твердых растворов  $\text{GaN}$ ,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и до 25–55% — у светодиодов на основе гетероструктур из твердых растворов  $\text{In}_y\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{P}$ .

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 1931 г. установила трехкоординатную 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 нм, что соответствует средней тепловой энергии электронов, поэтому координаты цветности их излучения лежат практически на линии «чистых» цветов локуса МКО 1931 г. Однако имеется и более простая единица, характеризующая цвет — доминирующая длина волны  $\lambda_{dom}$ , получаемая как результат пересечения прямой, проходящей через точку равноэнергетического источника типа «Е» и точку с координатами цветности данного светодиода и локуса МКО 1931 г.

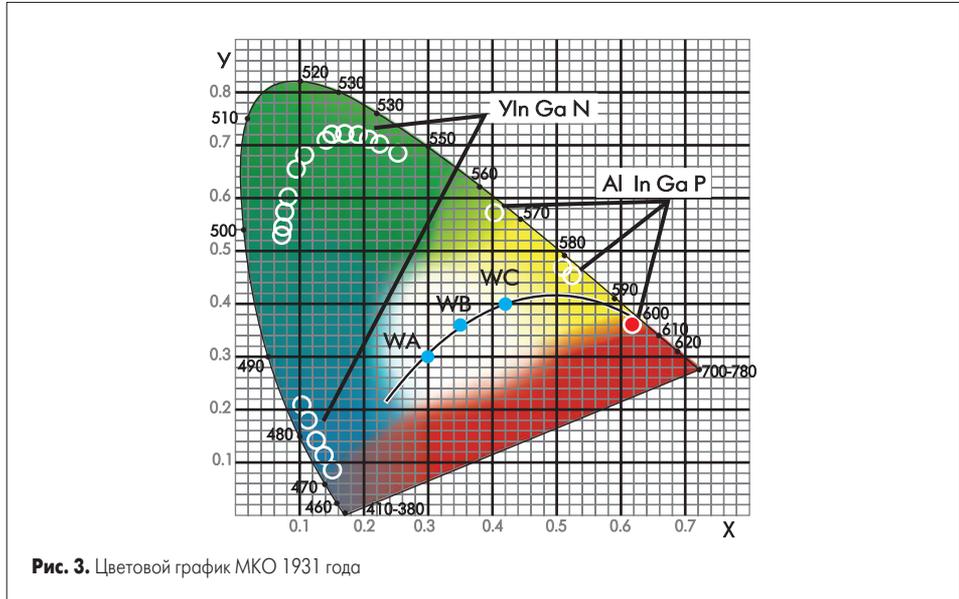


Рис. 3. Цветовой график МКО 1931 года

Именно ее указывают в технических характеристиках на светодиоды монохроматического излучения. Лишь отдельные фирмы, и Nichia в их числе, указывают координаты цветности, что, по сути, правильнее. Но для устройств отображения информации, где важность цветопередачи изображения имеет очень высокий статус, этих характеристик зачастую оказывается недостаточно. Поэтому разработчики 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  $\lambda_c$  и максимальная  $\lambda_{max}$  длины волн, полуширина спектра  $\lambda_{1/2}$ , интегральный коэффициент  $K$  [ $\text{lm}/W_{opt}$ ] [5].

$$K := 683 \frac{\text{lm}}{W} \frac{\int_{780}^{360} E(\lambda) \times V(\lambda) d\lambda}{\int_{780}^{360} E(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

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 трех основных цветов — RGB, необходимо, чтобы полуширина спектра источника каждого цвета была минимальна, что обеспечит высокую чистоту цвета поля изображения.

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.

Следует отметить, что все описанные выше характеристики светоизлучающих диодов находятся в непосредственной зависимости друг от друга, поэтому, как правило, лишь их со-

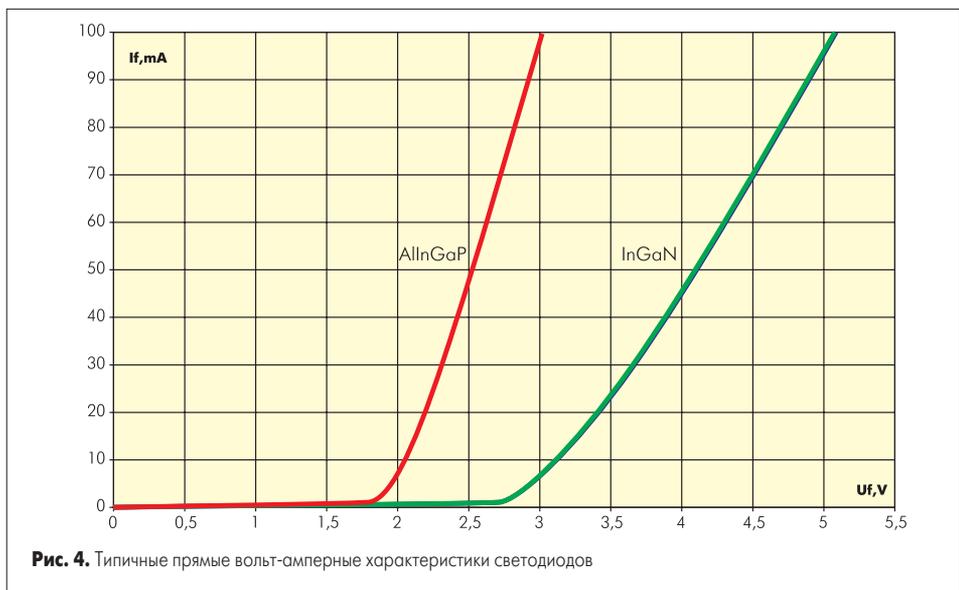
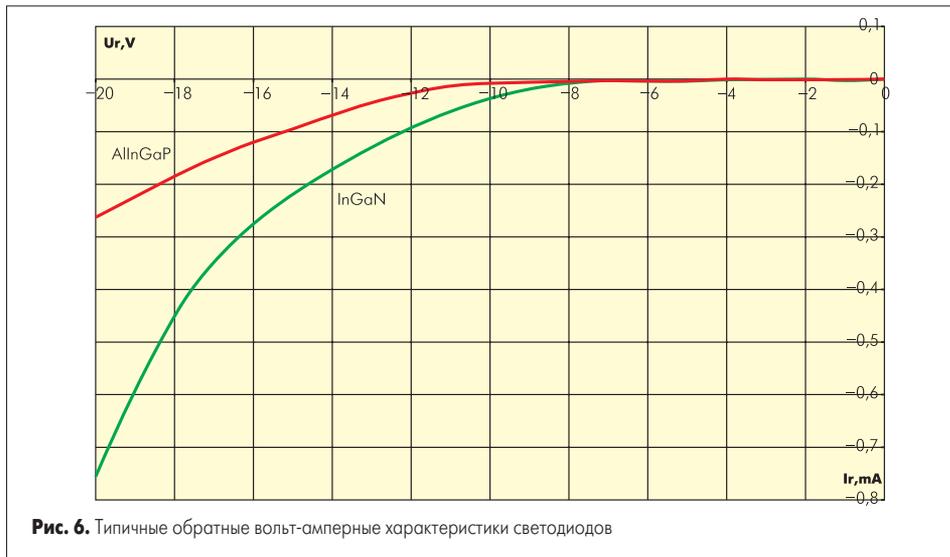
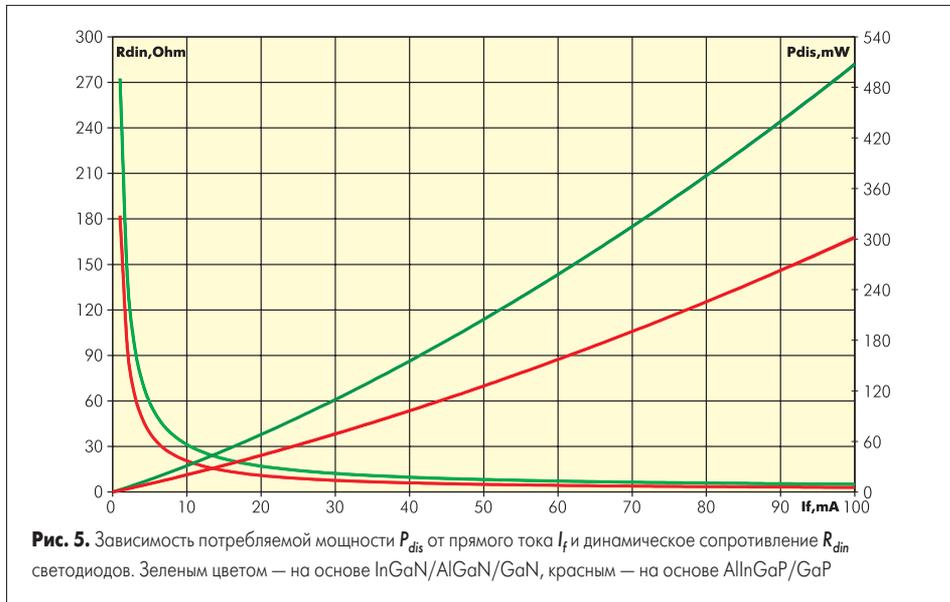


Рис. 4. Типичные прямые вольт-амперные характеристики светодиодов



вокупность позволяет правильно судить о тех или иных параметрах светодиода. Однако наиболее точно определить соответствие заявленным производителем параметров светодиода, его качество и долговечность можно лишь проведя комплекс измерений и расчетов его характеристик.

**Светодиодные глубины. Основы полупроводниковой оптоэлектроники**

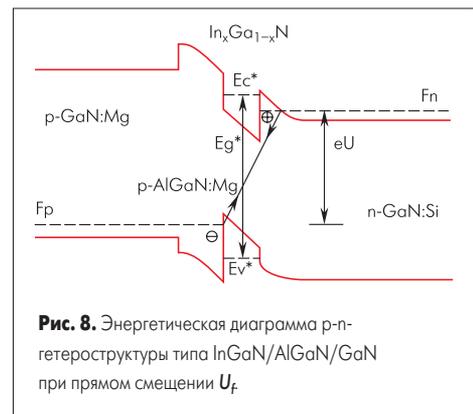
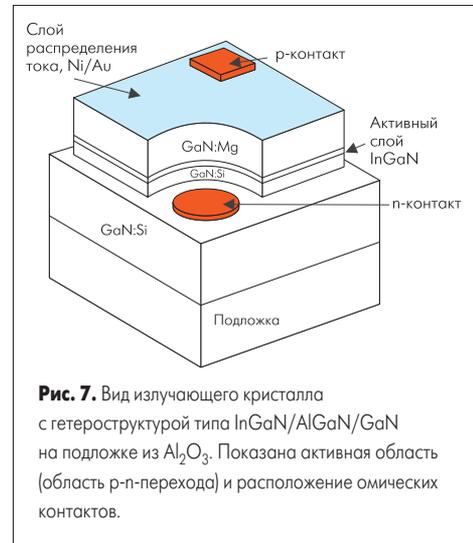
Если в кристалле полупроводника создан p-n-переход, то есть граница между областями с дырочной (p-) и электронной (n-) проводимостью, то при положительной полярности внешнего источника тока на контакте к p-области (и отрицательной — на контакте к n-области) потенциальный барьер в p-n-переходе понижается и электроны из p-области инжектируются в p-область, а дырки из p-области — в n-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 p- и n-областях желательно уменьшать толщину активной области, в которой идет рекомбинация. Но в обычных p-n-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 p- и n-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 p-n-перехода на гетерограницах слоя образуются потенциальные барьеры для электронов  $\Delta E_c$  и дырок  $\Delta E_v$ . Если приложить к переходу прямое

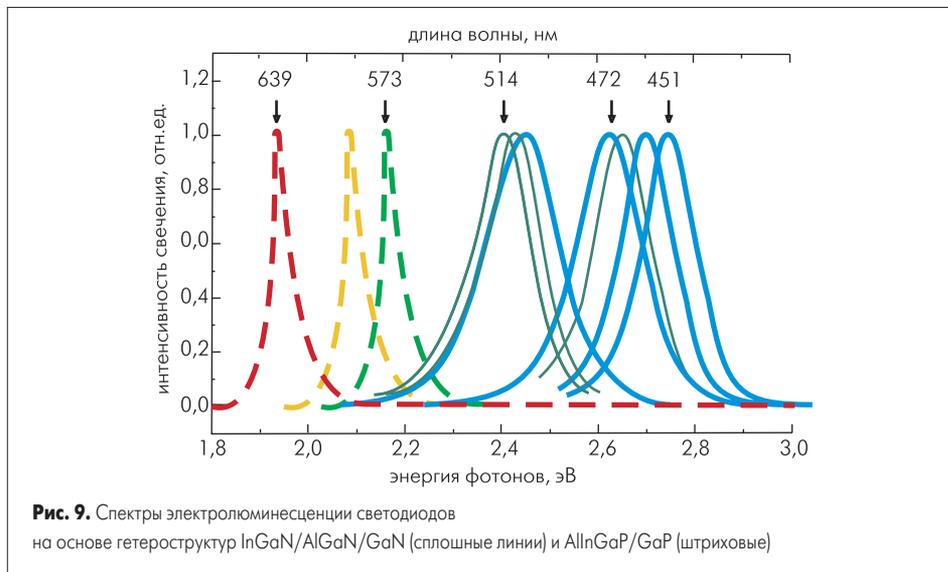


смещение, возникнет инжекция электронов и дырок с обеих сторон в узкозонный слой. Электроны будут стремиться занять положения с наименьшей энергией, спускаясь на дно потенциальной ямы в слое, дырки устремятся вверх — к краю валентной зоны в слое, где минимальны их энергии.

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  $\Delta E_c$ , дырки — на барьер  $\Delta E_v$ , 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 запрещенной зоны от 1,9 до 3,5 эВ (рис. 9). Твердые растворы AlGaInP на различных подложках излучают в диапазоне от 650 до 580 nm, структуры на основе GaN, InGaN имеют наибольший квантовый выход в пределах 540–400 nm.

Рекомбинация электронно-дырочных пар в таких материалах происходит преимущественно с выделением кванта света. Энергия кванта  $h\nu$  пропорциональна ширине запрещенной 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  $\eta_i$  (число излучаемых фотонов на одну электронно-дырочную пару). В гетероструктурах величина  $i$  теоретически может быть близка к 100%.

### 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 соблюдении 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).

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 идет 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.

В некоторых случаях достижения такого эффекта и для обеспечения максимальной равномерности диаграммы в материал линзы локально или по всему объему вводится диспергатор. В результате получается достаточно рациональная конструкция: с одной стороны, широкий (как правило, 110 градусов по уровню 0,5) угол в горизонтальной плоскости дает возможность построить экран, наблюдаемый под большими углами в этой плоскости без искажений, с другой стороны, небольшой вертикальный (30–50 градусов 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. Сложность 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 раз-

мерами, правильно подобранной оптикой, процентным содержанием диспергатора в материале линзы и т. д. Невыполнение этого условия и приводит к появлению описанных искажений изображения, сформированного кластером из таких светодиодов (рис. 12). Поэтому важно понимать, что построение качественного устройства воспроизведения полноцветного изображения, где имеет место смешение цветов и формирование оттенков, невозможно без учета характеристик распределения светового потока внутри диаграммы пространственного распределения излучения. Это условие касается также 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 и 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 обсужден 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 определенное соотношение интенсивностей основных цветов по формуле (7), исходя из спектральных параметров,

$$F = rR + gG + bB, \quad (6)$$

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.

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

Следующим шагом в разработке конструкций светодиодов для систем отображения информации высокого качества стали многокристалльные светодиоды с различным цветом излучения и полноцветный (RGB, Full color) прибор, содержащий три кристалла в одном



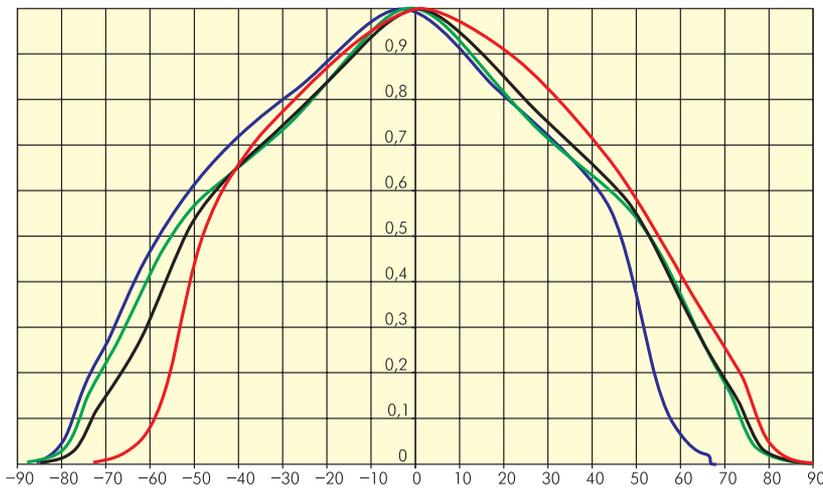
**Рис. 10.** Фрагмент полноцветного кластерного экрана. Пиксели собраны из светодиодов основных цветов



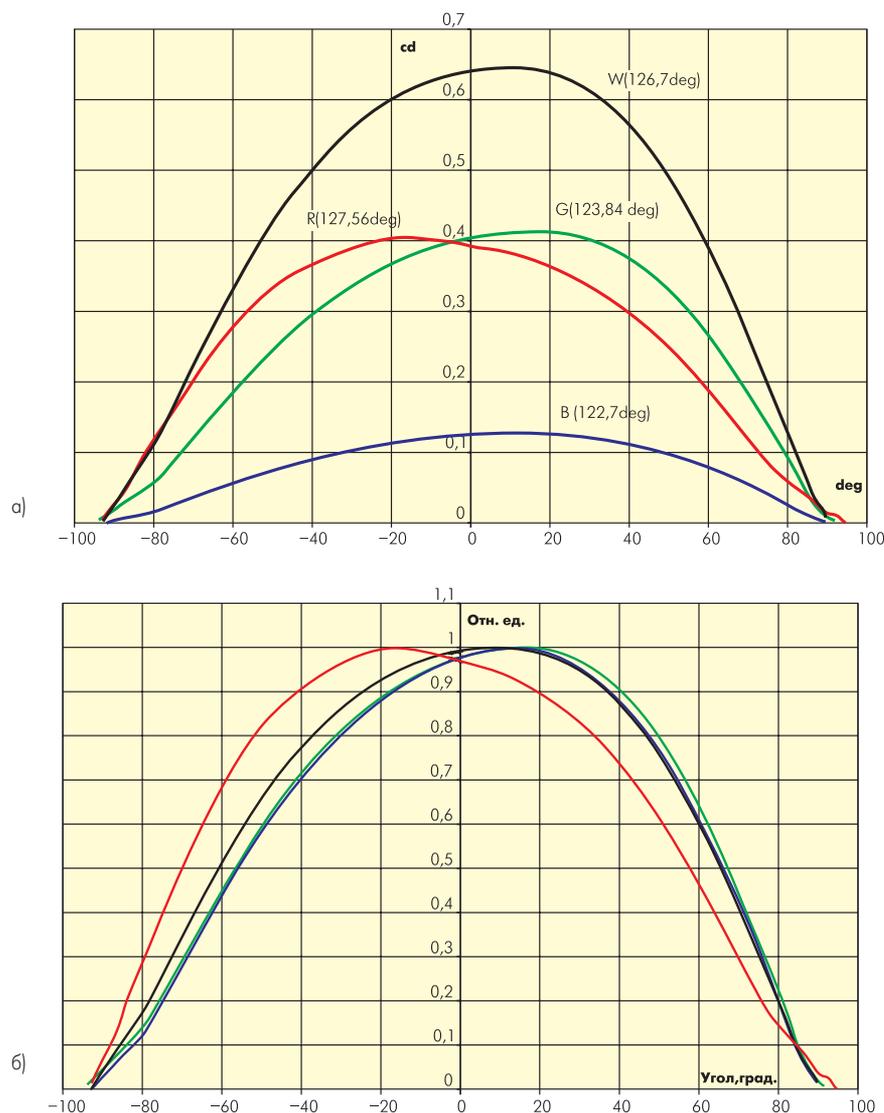
**Рис. 11.** Светодиоды фирмы «COTCO» типа LO5SMQ \_\_-BOG с овальной оптикой 110×50 град

**Таблица 1**

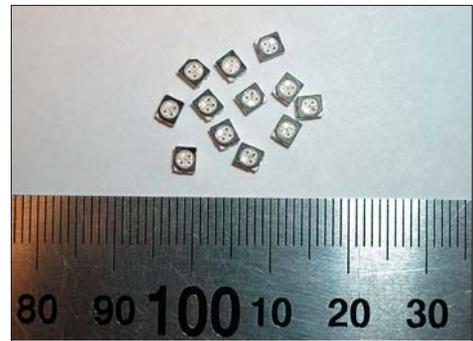
	X	Y
R	0,61–0,7	0,32–0,35
G	0,27–0,36	0,55–0,65
B	0,13–0,17	0,04–0,08



**Рис. 12.** Относительная диаграмма пространственного распределения силы света кластера из трех светодиодов R, G, B фирмы Toyoda Gosei типа E1L4E-S с овальной оптикой и линейным расположением светодиодов в горизонтальной плоскости. Черным 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.



**Рис. 14.** Абсолютная (а) и относительная (б) диаграммы пространственного распределения силы света трехкристального RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ фирмы COTCO с дельтаобразным расположением кристаллов внутри корпуса. Черным 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



**Рис. 13.** Полноцветные светодиоды для SMD-монтажа

корпусе (рис. 13), позволяющий формировать любой оттенок свечения (в том числе белый) как результат матрицирования трех цветов.

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/м<sup>2</sup>. Размер пикселя при этом получается равным размеру одного светодиода, а смешение цветов вообще происходит в точке с размером примерно 0,8×0,3 мм. Более того, будучи расположенными на одном основании, все три 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  $\cos \theta$ . Однако взаимное геометрическое расположение кристаллов все же вносит искажения в равномерность смешения световых потоков (рис. 14).

Но по сравнению со светодиодами с овальной оптикой, качество равномерности распределения намного выше на отдаленных 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 фор-

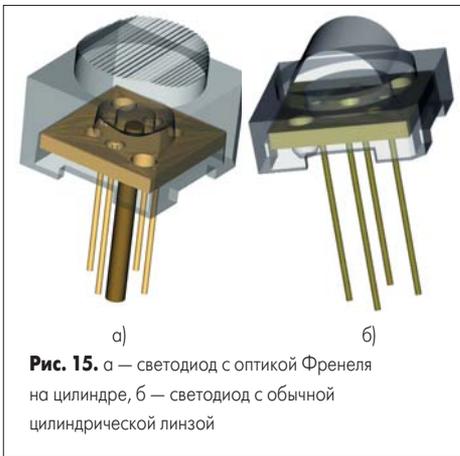


Рис. 15. а — светодиод с оптикой Френеля на цилиндре, б — светодиод с обычной цилиндрической линзой

мирующих подобие диаграммы направленности овальных светодиодов. Например светодиоды фирмы «Корвет-Лайтс» (рис. 15), позволяющие использовать кристалл при повышенных плотностях тока — до  $80 \text{ A/cm}^2$ , и обладающих увеличенной по сравнению с другими конструкциями светоотдачей.

Однако равномерного смещения 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 три 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 трудоемко с технологической точки зрения и приводит к удорожанию продукта. Как правило, за основу берут один параметр, который можно скорректировать уже в составе светодиода. Это сила света. Цветовые характеристики кристаллов тестируются и разделяются еще до монтажа. 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 трех 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 остается 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 учесть программно и на самых малых уровнях интенсивности при самых коротких импуль-

сах, 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 ухода характеристик светодиодов сведены преимущественно только к температурным зависимостям. И хотя это также является довольно серьезной темой для обсуждения, стоит говорить об этом отдельно, чтобы рассмотреть все подробности.

#### 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 произведенной продукции, а, что самое важное, принципиально различными конструкциями кристаллов собственных разработок. Поэтому исследуя конкретный светодиод, помимо его технических характеристик немаловажно знать, на основе кристалла какого производителя он изготовлен. Как правило, зная это, опытному пользователю светодиодами сразу ответит на многие вопросы еще до рассмотрения других данных. Однако любая наука базируется на исключительно объективных сведениях. Получить 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 расчетов 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 компаний-лидеров.

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, произведенных в Юго-Восточной Азии. Это приборы фирм Brightek, ETR, GUANGYI, Lanbaoli elektronik, Golden Valley Opto, Lite-Max opto, SINO, ULTRALIGHT electronic, Sitronics Co., LED YI LIU, KENA, Shuen, Ningbo Foryard Opt., SANDER, Ledman и др.

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  $\pm 0,5 \text{ mA}$ . Это 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 тыс. 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 можно 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 надежности.

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 эффективность 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, нанесенную на рамку светодиода. Они стали удачным продолжением в усовершенствовании кристаллов MBright™ на подложке SiC, отличающейся лучшей, чем сапфир, совместимостью кристаллических решеток подложки и выращенной на ней структуры InGaN/GaN. Применение кристалла XBright™ позволило практически сравнить энергетические показатели светодиодов синего и зеленого цвета излучения со светодиодами фирмы NICHIA, не изменяя цены, и, что самое важное, — надежности светодиода. А светодиоды с кристаллом CREE XThin™ фирмы Ledman превзошли по энергетическим параметрам идентичные по характеристикам приборы лидера светодиодостроения. Например высший ранг наиболее используемых в экранах светодиодов с овальной линзой и углом излучения 110×50 град светодиодов фирмы NICHIA NSP\_546 имеет осевую силу света до 2,4 cd (зеленый цвет), в то время как фирма COTCO заявляет 2,3 cd у LO5SMQPG4-BOG-A1, что подтвердилось при исследованиях. Синий COTCO LO5SMQBL4-BOG-A1 также с углом излучения 110×50 град имеет осевую силу света до 0,75 cd (табл. 2). Световой поток кристаллов CREE представлен в таблице 3.

**Таблица 2**

Цвет	Тип. Iv, cd.	
	NICHIA 110×50 град	COTCO 110×50 град
Green	2,44	2,3
Blue	1,0	0,75

**Таблица 3**

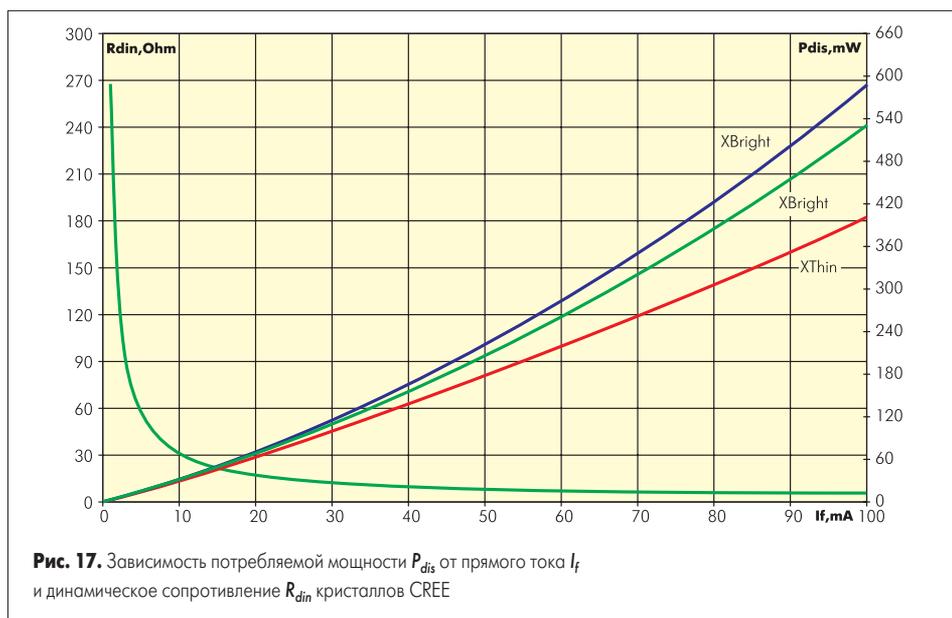
Цвет	Тип. F, lm при 20 mA		
	MBright™	XBright™	XThin™
Green	1,4	1,8	2,1
Blue	0,3	0,5	0,7

Световая отдача кристаллов CREE XThin™ достигает 35–40 lm/W за счет значительного уменьшения прямого падения напряжения  $U_f$  во всем диапазоне токов. На рис. 16, 17 показана эволюция вольт-амперных характеристик семейства кристаллов CREE, наглядно поясняющая это утверждение.

Использование таких светодиодов позволяет формировать экраны и табло с шагом пикселей 22 мм и яркостью до 8000 cd/m<sup>2</sup>. При шаге пикселей 19 мм можно достичь яркости 10 тыс. cd/m<sup>2</sup>. При этом полностью сохраняется надежность и долговечность работы экрана.

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

- Великолепный отвод тепла от р-п-перехода (тепловое сопротивление «р-п-переход —

**Рис. 16.** Прямые вольт-амперные характеристики кристаллов CREE**Рис. 17.** Зависимость потребляемой мощности  $P_{dis}$  от прямого тока  $I_f$  и динамического сопротивления  $R_{din}$  кристаллов CREE

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 объему. Поэтому выход квантов наблюдается по всей поверхности граней кристалла, а их площадь примерно в четыре раза больше, чем у кристалла на подложке из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (рис. 19).
- Площадь верхнего омического контакта, несмотря на маленький размер, не влияет на равномерность растекания тока, так как р-п-переход расположен в противоположной стороне от него, а распределение тока формируется толщиной 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

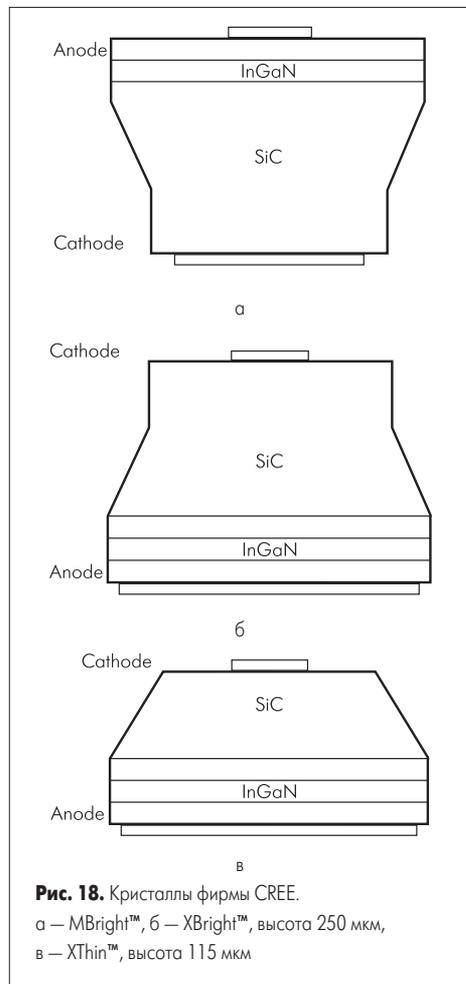
(подложки) при увеличении температуры работающего кристалла.

- 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/см<sup>2</sup>. Кристаллы конструкций на рис. 19 теряют линейность, едва достигая плотности тока 100–120 А/см<sup>2</sup>.

Технология посадки кристалла способом «flip-chip» встречается не впервые. Toyota Gosei применяет эту технологию для кристаллов на подложках из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Светодиоды фирмы отличаются высокой надежностью, которую, помимо конструкции кристалла, обеспечивает еще и смонтированный рядом с излучающим кристаллом быстроредействующий диод Шоттки, включенный обратно и шунтирующий светодиод при подаче большого обратного напряжения. Однако светотехнические параметры этих светодиодов ниже, чем у COTCO.

**Группа 2.**

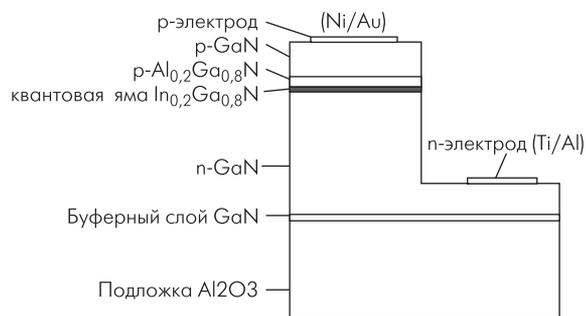
Другая часть производителей, которые используют в производстве своих светодиодов кристаллы преимущественно конструкций — прототипов NICHIA, разделилась на несколь-



ко 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 различались 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 ее продаваемой, потому как проверить истинность параметров потребителю в подавляющем большинстве случаев бывает невозможно, а по виртуальным, написанным на бумаге характеристикам, светодиоды обладают неплохими параметрами. Но выясняется, что все далеко не так.

### Группа 3.

Следующая категория — 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 резуль-



**Рис. 19.** Кристалл на подложке из сапфира.

Высота 110 мкм, тепловое сопротивление «р-п-переход — кристаллодержатель» 80–150 град/Вт

таты измерения, получения и моделирования деградационных характеристик требуют более тщательного, чем просто ознакомительное, обсуждения из-за большого объема плотную связанных друг с другом параметров и непременно станут темой будущих статей. Стоит привести здесь 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 ин-

формации 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 из-за различия причин ее 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 характеристиках светодиода от нормы.

### Группа 4.

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

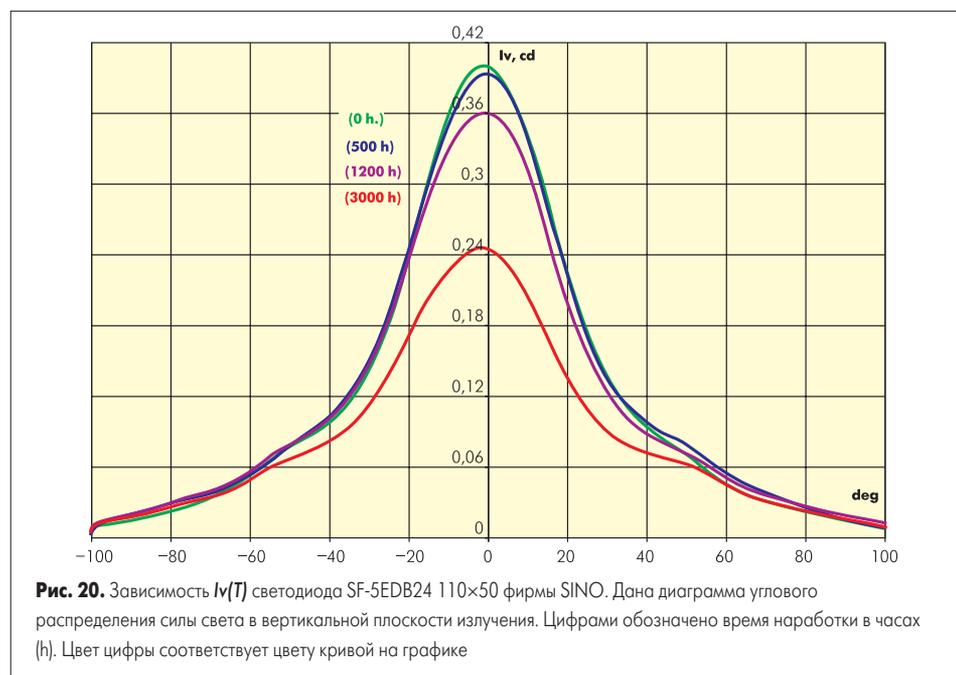


Таблица 4

Группа светодиодов	средний разброс осевой Iv в партии, %		средняя деградация осевой Iv в партии, %	% деградировавших по Iv 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

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, определенных описанным методом как неизбежно выходящих из строя, практически одинаково и составляет примерно 12–15%.

Некоторые данные о результатах этих исследований сведены в таблицу 4.

Причем изначально эти светодиоды признаются годными, потому как действительно соответствуют всем параметрам производи-

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

#### Некоторые итоги исследований

Подытоживая сказанное, стоит заметить, что проводимые исследования и постоянный мониторинг 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 ос-

нове. Нельзя не уделять внимание некоторым, принципиально различающимся 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 зеленых и синих InGaN-светодиодов // «Светодиоды и лазеры» № 1, 2. 2002. С. 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. С. 6–11.